

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA
ELECTROMECAÁNICA PORTÁTIL COMO APOYO A LA RECOLECCIÓN
DEL FRUTO DE CAFÉ

Autor:

JEYSON ANDRÉS HERNÁNDEZ BARBOSA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMAGA

2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA
ELECTROMECAÁNICA PORTÁTIL COMO APOYO A LA RECOLECCIÓN
DEL FRUTO DE CAFÉ

Autor: JEYSON ANDRÉS HERNÁNDEZ BARBOSA

Director: SEBASTIAN ROA PRADA, PhD

Codirector: OSCAR EDUARDO RUEDA SANCHEZ, MsC

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMAGA

2019

Sebastián Roa Prada
Director de tesis de grado

Oscar Eduardo Rueda Sánchez
Codirector de tesis de grado

Victor Ángel Ardila Acuña
Evaluador de tesis

Sergio Andrés Ardila Gómez
Evaluador de tesis

Agradezco a la Universidad Autónoma de Bucaramanga, por su apoyo y financiación en la ejecución de este proyecto.

Agradezco a mi director de grado, por su paciencia, entrega y amor hacia su profesión. A mis profesores, por su disposición de entregar lo mejor de sí mismo en cada lección no sólo en el aula, sino en la vida.

Agradezco a mi madre, por su valentía, su amor y sus infinitas ganas de soñar que fueron para mí un ejemplo, inspiraron en mí la pasión, fortaleza y valor que me permitió llegar hasta aquí.

Agradezco a mi padre, por ser un apoyo incondicional, un amigo fiel y enseñarme que la pasión lleva a los hombres más allá de ellos y de sus limitaciones.

Agradezco a mis hermanos, por brindarme su moral apoyo en cada etapa de este proceso. A todas aquellas personas que directa e indirectamente, pusieron un granito de arena para llegar hasta aquí.

Agradezco a Sofía, por ser mi compañera en este largo viaje, por brindarme su apoyo incondicional, por creer en mí ciegamente, por su infinito amor y sus ganas de querer siempre inspirar a los demás a ser mejor.

JEYSON A. HERNÁNDEZ B.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo General	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3. ANTECEDENTES.....	13
4. ESTADO DEL ARTE.....	14
5. MARCO TEÓRICO	20
5.1. GENERALIDADES DEL CAFÉ	20
5.1.1. Café	20
5.1.2. Cultivo	22
5.1.3. Árbol	29
5.1.4. Fruto.....	31
5.2. TECNOLOGÍA AGRÍCOLA.....	33
5.2.1. Mecanización agrícola	33
5.2.2. Cosecha asistida	34
5.2.3. Agricultura de precisión.....	35
5.3. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	36
5.3.1. Teoría de simulación	36
5.3.2. Propiedades físicas del café	38
5.3.3. Métodos de desprendimiento del fruto de café	40
5.4. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO MECATRÓNICO	44
5.4.1. Metodologías aplicadas.....	45
6. METODOLOGÍA.....	50
6.1. DEFINICIÓN Y ESPECIFICACIÓN	52
6.2. MODELADO.....	59
6.2.1. Parametrización del modelo.....	59
6.3. SIMULACIÓN.....	63
6.3.1. Consideraciones de la simulación	64

6.3.2.	Resultados de la simulación	66
6.3.3.	Conclusiones de la simulación	68
6.4.	DISEÑO MECÁNICO Y ELÉCTRICO	69
6.4.1.	Diseño del extremo de la herramienta (actuador final).....	69
6.4.2.	Selección de motores del actuador final	70
6.4.3.	Diseño de brazo de soporte del actuador final	72
6.4.4.	Diseño del eslabón de soporte del extremo de la herramienta	75
6.4.5.	Selección del dinamo y baterías	77
6.4.6.	Diseño de acople del dinamo al eje de la guadañadora	78
6.5.	OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO	80
6.5.1.	Optimización del mecanismo de apertura de los brazos	80
6.5.2.	Optimización del sistema de sujeción de los dientes de la herramienta	83
6.5.3.	Optimización del manubrio.....	85
6.5.4.	Optimización del sistema de control de las variables del sistema 90	
6.5.5.	Optimización de los dientes de la herramienta	91
6.5.6.	Optimización del sistema de alimentación de energía	92
6.6.	DISEÑO ELECTRÓNICO	93
6.6.1.	Sistema de control de apertura de brazos	93
6.6.2.	Sistema control de velocidad de los motores del extremo	94
6.7.	PLANOS DE CONSTRUCCIÓN Y LISTA DE MATERIALES	95
6.8.	VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO	95
7.	CONCLUSIONES	100
	BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Herramienta Alfa [28]	14
Ilustración 2. Vibrador portátil de tallo CIFARELLI SC700 [29]	15
Ilustración 3. Impactador de ramas [30]	15
Ilustración 4. Actuadores oscilantes STIHL 81 [31]	16
Ilustración 5. Sacudidor Cenicafé I [32]	16
Ilustración 6. Cosechador mecánico industrial [33]	17
Ilustración 7. Actuador IMFRA 3DC [34].....	17
Ilustración 8. Herramienta RASELCA-II [35].....	18
Ilustración 9. Herramienta Descafé [36]	18
Ilustración 10. Canastilla para la recolección de frutos de café [37].....	19
Ilustración 11. Prototipo de mecanismo de recolección de café [38].....	19
Ilustración 12. Producción de café en los principales países exportadores (2013/14 - 2016/17) [40].....	20
Ilustración 13. Principales importadores de café del mundo en el año 2013 [6]...	21
Ilustración 14. Regiones cafeteras de Colombia [4]	23
Ilustración 15. Arreglos espaciales de los cafetales colombianos. [53].....	24
Ilustración 16. Trazado de cultivos en curvas de nivel [41].....	25
Ilustración 17. Trazado de cultivos en: a) Triángulo, b) Cuadrado o rectángulo ..	25
Ilustración 18. Sistemas de producción de café en Colombia. a. [42] b. [4] c. [43] d. [44].....	26
Ilustración 19. Métodos de recolección de café. a. [45] b. [46] [47].....	27
Ilustración 20. Ventajas y desventajas del picking [Autor]	28
Ilustración 21. Ventajas y desventajas del stripping [Autor]	28
Ilustración 22. Café Arábica [49].....	29
Ilustración 23. Café Robusta [50].....	30
Ilustración 24. Tabla de variedades de café [48].....	30
Ilustración 25. Composición del fruto de café. [4]	31
Ilustración 26. Etapas de desarrollo del fruto de café. [8].....	32
Ilustración 27. Cosechadora industrial. [35]	34
Ilustración 28. Cosecha asistida de café. [51]	35
Ilustración 29. Aplicaciones de la agricultura de precisión. [52]	35
Ilustración 30. Etapas de una simulación [54]	37
Ilustración 31. Modos de simulación [14]	38
Ilustración 32. Dimensiones contempladas de los frutos y pedúnculos [55]	38
Ilustración 33. Estadígrafos de las propiedades físico-mecánicas de los frutos y pedúnculos [55].....	39
Ilustración 34. Propiedades geométricas del cafeto y sus frutos en dos edades y dos localidades [56].....	40

Ilustración 35. Propiedades físico-mecánicas de la madera del cafeto [57].....	40
Ilustración 36. Módulo de Young de la madera de café [63].....	40
Ilustración 37. Esquema ideal del vibrador inercial aplicado a una planta de cafeto [17].....	41
Ilustración 38. Medición de la fuerza de desprendimiento usando un dinamómetro [58].....	41
Ilustración 39. Análisis de la fuerza de desprendimiento de frutos maduros y verdes [58].....	42
Ilustración 40. Penetración del interfase cáscara-mucilago de frutos de café con un punzón de cabeza cónica [60].....	42
Ilustración 41. Promedio de la fuerza de espetación [60].....	43
Ilustración 42. Fuerza de desprendimiento de frutos de café por espetación [60]	43
Ilustración 43. Metodología de diseño de sistemas mecatrónicos [39].....	44
Ilustración 44. Diagrama de análisis de la necesidad (Toro) [Autor].....	46
Ilustración 45. Diagrama de análisis funcional de la necesidad (Pulpo) [Autor] ...	47
Ilustración 46. Diagrama FAST [20].....	48
Ilustración 47. Matriz de implementación de funciones de calidad (QFD) [Autor]	49
Ilustración 48. Metodología de diseño de sistemas mecatrónicos aplicada al proyecto [Autor].....	51
Ilustración 49. Visita técnica a la sala de control de calidad de la Hacienda el Roble. (De izq. a der.) S. Roa, B. Ruiz, O. Rueda, J. Hernández.....	52
Ilustración 50. Diagrama de análisis de la necesidad de la herramienta electromecánica [Autor].....	53
Ilustración 51. Diagrama de análisis funcional de la necesidad de la herramienta electromecánica [Autor].....	54
Ilustración 52. Diagrama FAST para mejorar la calidad de recolección [Autor]....	56
Ilustración 53. Diagrama FAST para adaptabilidad al terreno [Autor].....	56
Ilustración 54. Diagrama FAST para implementar un sistema de control [Autor] .	57
Ilustración 55. Diagrama FAST para optimizar el diseño de la herramienta [Autor].....	57
Ilustración 56. Diagrama QFD para mejorar la calidad del café [Autor].....	58
Ilustración 57. Diagrama QFD para adaptabilidad al terreno [Autor].....	59
Ilustración 58. Modelo CAD base para la parametrización [Autor].....	60
Ilustración 59. Alternativas de formas de dientes sugeridas [Autor].....	62
Ilustración 60. Geometría simulación de impacto [Autor].....	63
Ilustración 61. Geometría simulación de deformación y desplazamiento [Autor] .	63
Ilustración 62. Rama simulada como viga en voladizo [Autor].....	64
Ilustración 63. Fuerza que simula el desplazamiento de los dientes [Autor].....	64
Ilustración 64. Geometría simplificada [Autor].....	65

Ilustración 65. Malla personalizada para el punto de contacto [Autor]	65
Ilustración 66. Punto de análisis de esfuerzo máximo [Autor]	66
Ilustración 67. Gráfica de fuerza de desprendimiento vs tensión de Von Mises máxima [Autor]	66
Ilustración 68. Superficie de variación de tensión de Von mises [Autor]	67
Ilustración 69. Curvas de nivel de la tensión de Von Mises [Autor]	67
Ilustración 70. Pieza de soporte del elastómero [Autor]	69
Ilustración 71. Vista de corte transversal de la pieza de soporte del elastómero [Autor]	70
Ilustración 72. Pieza de elastómero [Autor]	70
Ilustración 73. Análisis de cargas de la pieza de soporte del elastómero [Autor] ..	71
Ilustración 74. Motorreductor 20.4:1 25Dx50L/5.5 kg-cm/460 RPM (Marca Pololu) [26]	71
Ilustración 75. Vista transversal del acople del motor a la pieza de soporte del elastómero [Autor]	72
Ilustración 76. Prototipo planteado previamente [Autor]	72
Ilustración 77. Alternativa 1 [Autor]	73
Ilustración 78. Alternativa 2 [Autor]	73
Ilustración 79. Brazo de soporte del actuador final [Autor]	74
Ilustración 80. Accesorios de bronce para disminuir la fricción [Autor]	74
Ilustración 81. Eslabón de soporte de los brazos [Autor]	75
Ilustración 82. Ensamblaje final del extremo de la herramienta [Autor]	75
Ilustración 83. Manubrio y mando de apertura de los brazos de la herramienta [Autor]	76
Ilustración 84. Ensamblaje total del mecanismo [Autor]	76
Ilustración 85. Batería Netion 6v 10Ah [62]	77
Ilustración 86. Dinamo seleccionado [64]	78
Ilustración 87. Acople del dinamo al eje de la guadañadora [Autor]	79
Ilustración 88. Mecanismo de apertura de los brazos (inicial) [Autor]	79
Ilustración 89. Mecanismo de apertura de los brazos (inicial) [Autor]	81
Ilustración 90. Movimientos alternantes alrededor del eje de soporte [Autor]	81
Ilustración 91. Mecanismo de apertura de los brazos (final) [Autor]	81
Ilustración 92. Movimientos de la tijera con respecto al desplazamiento del actuador lineal [Autor]	82
Ilustración 93. Actuador lineal seleccionado [66]	82
Ilustración 94. Movimientos alternantes con respecto al movimiento mecánico [Autor]	83
Ilustración 95. Sistema de sujeción de los dientes de la herramienta implementado [Autor]	84

Ilustración 96. Comparación de los sistemas de sujeción. Final (Izquierda), Anterior (Derecha) [Autor]	84
Ilustración 97. Diseños de manubrio sugeridos [Autor].....	86
Ilustración 98. Simulación esfuerzos y deformaciones (Diseño 1) [Autor]	87
Ilustración 99. Simulación esfuerzos y deformaciones (Diseño 2) [Autor]	87
Ilustración 100. Fuerzas sometidas (Diseño 1) [Autor]	88
Ilustración 101. Fuerzas sometidas (Diseño 2) [Autor]	89
Ilustración 102. Diseño de manubrio optimizado [Autor]	89
Ilustración 103. Diseño del sistema de control de las variables del sistema [Autor]	90
Ilustración 104. Mando de control del sistema [Autor]	91
Ilustración 105. Batería lipo seleccionada [67]	92
Ilustración 106. Componentes del sistema de electrónica de potencia [Autor].....	93
Ilustración 107. Esquema de circuito de control del actuador lineal [Autor]	94
Ilustración 108. Esquema de circuito de control de velocidad [Autor]	94
Ilustración 109. Arboles de café usados para la validación [Autor].....	96
Ilustración 110. Prueba de desprendimiento de frutos maduros [Autor]	97
Ilustración 111. Prueba de rendimiento de desprendimiento [Autor]	97
Ilustración 112. Arboles de café usados para la validación 2 [Autor]	98
Ilustración 113. Prueba de desprendimiento de frutos maduros e impacto al cafeto [Autor]	99
Ilustración 114. Volumen de frutos totales recolectados [Autor].....	99

1. INTRODUCCIÓN

La industria cafetera de Colombia posee un gran impacto socio-económico en el panorama nacional, ya que constituye una de las actividades económicas más importantes de la agricultura colombiana [1]. En los últimos años, se ha observado una disminución importante en la oferta de mano de obra disponible para el cuidado, cosecha y pos cosecha del cultivo de café, mientras que la demanda va en aumento en conjunto con el área cultivada de café. [2]

Como resultado de la disminución de la mano de obra en zonas cafeteras, importantes entidades con amplio conocimiento en el campo de investigación cafetero como: CENICAFE y la Federación Nacional de Cafeteros, se han visto en la necesidad de generar soluciones que permitan hacer las tareas de recolección de café de forma más ágil, eficiente y con el menor esfuerzo físico posible para optimizar y aumentar la cosecha del café, con el menor número de operarios posibles. [3]

Atendiendo al problema anteriormente descrito, este proyecto se orientó hacia el desarrollo de una herramienta portátil utilizada por un operario, capaz de desprender las cerezas de café del árbol evitando que caigan frutos verdes, y que a futuro pueda ser usada de manera independiente por un brazo robótico articulado para realizar la recolección de manera automatizada.

En el desarrollo de la herramienta se usaron metodologías del diseño mecatrónico como: el diseño basado en la necesidad, diseño funcional, modelado y simulación de la herramienta portátil. Con el desarrollo de este proyecto, se obtuvieron planos detallados para la construcción de la herramienta, un paso a paso del diseño mecatrónico implementado durante el desarrollo del proyecto hasta llegar a la construcción del prototipo funcional capaz de desprender la cereza de café del árbol, desprendiendo el menor número de frutos verdes posibles.

Este proyecto de grado aporta al desarrollo del proyecto de investigación titulado “Desarrollo de una herramienta para desprendimiento de granos de café” presentada a la convocatoria interna bienal 2017-2018 de la UNAB por los profesores Sebastián Roa Prada y Oscar Eduardo Rueda Sánchez.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar una herramienta electromecánica portátil capaz de desprender frutos maduros del árbol de café.

2.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar la arquitectura física, mecanismos de accionamiento y de sensado de la herramienta.
- Determinar las variables dinámicas que influyen en el desprendimiento del fruto de café maduro según el mecanismo de accionamiento seleccionado.
- Realizar el diseño asistido por computador de la herramienta.
- Seleccionar los actuadores y sensores comerciales de la herramienta siguiendo una metodología reconocida para el diseño de sistemas mecatrónicos.
- Diseñar e implementar el sistema de electrónica de potencia.
- Construir un prototipo de la herramienta portátil.
- Validar experimentalmente el funcionamiento del prototipo.

3. ANTECEDENTES

No hay antecedentes sobre herramientas de recolección o mecanismos para cosechar café en la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

4. ESTADO DEL ARTE

El desarrollo en investigación de herramientas para facilitar la recolección de café ha sido un tema ampliamente estudiado en las últimas dos décadas, estos esfuerzos se han concentrado casi por completo en organizaciones como: CENICAFE y la Federación Nacional de Cafeteros. Por lo que se plantea como un tema importante con un gran impacto en la economía agrícola colombiana y como una necesidad identificada que merece un constante desarrollo en el área. Las alternativas de solución planteadas han abarcado desde accesorios de apoyo a la recolección manual hasta mecanismos de operación mecánica, estos se exponen de manera más amplia en este segmento.

Algunas herramientas desarrolladas en las últimas décadas son:

ALFA

Esta herramienta desarrollada por CENICAFE en el 2015, consta de un actuador electro-mecánico alimentado por una batería. Posee un rodillo con dientes metálicos que permite desprender los frutos. Capaz de recolectar hasta un 32.7% más de frutos de café por hora que con la recolección manual.



Ilustración 1. Herramienta Alfa [28]

VIBRADOR PORTÁTIL DE TALLO CIFARELLI SC700

Esta herramienta de la compañía española CIFARELLI, consta de un acople mecánico que sujeta el tallo mientras el mecanismo de vibración sacude el árbol. Esta herramienta fue diseñada como un acople de guadañadora por lo que posee

una guaya que convierte la energía del motor de combustión en energía mecánica vibratoria.



*Ilustración 2. Vibrador portátil de tallo
CIFARELLI SC700 [29]*

IMPACTADOR DE RAMAS

Esta herramienta también desarrollada por CENICAFE en el 2001, consta de un actuador electro-mecánico alimentado por corriente alterna. Posee un sistema de dos eslabones unidos al eje de un motor, que impactan la rama del cafeto para desprender los frutos mediante la vibración generada. Esta herramienta quedó en estado de prototipo, sin embargo fue la base para los mecanismos vibradores siguientes.



Ilustración 3. Impactador de ramas [30]

ACTUADORES OSCILANTES STIHL 81

Esta herramienta de una compañía colombiana llamada STIHL, consta de unos dedos mecánicos que vibran sacudiendo las ramas del árbol. Esta herramienta fue diseñada como un acople de guadañadora por lo que posee una guaya que convierte la energía del motor de combustión en energía mecánica vibratoria.



Ilustración 4. Actuadores oscilantes STIHL 81 [31]

SACUDIDOR CENICAFÉ I

Esta herramienta desarrollada por CENICAFÉ en el 2013, consta de un acople mecánico que sacude los frutos dentro de él mediante la aplicación de aire comprimido. Esta herramienta fue un diseño adaptado del sacudidor de café “MAIBO beater” de una compañía italiana. Puede igualar la cantidad de frutos recogidos mediante recolección manual, sin embargo la cantidad de frutos verdes por masa cosechada aumenta hasta un 21.5%.



Ilustración 5. Sacudidor Cenicafé I [32]

COSECHADOR MECÁNICO INDUSTRIAL

Este mecanismo ampliamente usado en los cultivos brasileños posee unos rodillos con brazos articulados que vibran a medida que los rodillos giran, haciendo que todos los frutos se desprendan. Este mecanismo es muy eficiente sin embargo poco práctico para la topografía y variedad de café colombiano, ya que el cultivo colombiano a diferencia del brasileño no posee arboles de café con madurez uniforme.



Ilustración 6. Cosechador mecánico industrial [33]

ACTUADOR IMFRA 3DC

Esta herramienta diseñada por CENICAFÉ en el 2005, consta de dos extremidades mecánicas que sacuden los frutos entre ellos a medida que las extremidades giran sobre su propio eje. Esta herramienta hace parte de la serie IMFRA que ha ido mejorando su modelo de recolección manual progresivamente. Este mecanismo posee una eficacia del 80%, aunque la cantidad de frutos verdes por masa cosechada puede ser de hasta un 19.3%.



Ilustración 7. Actuador IMFRA 3DC [34]

HERRAMIENTA RASELCA-II

Esta herramienta desarrollada por CENICAFÉ en el 2005 posee unos hilos de nilón en su interior, que sirven para desprender los frutos a medida que avanza por la rama. Esta herramienta es un accesorio de uso manual que no reemplaza sino por el contrario facilita la recolección manual. Esta herramienta posee una eficacia de aproximadamente 60%, por lo que se han generado varios prototipos a partir de estos diseños.

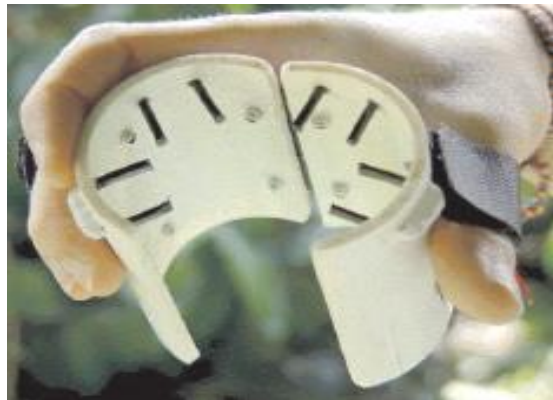


Ilustración 8. Herramienta RASELCA-II [35]

HERRAMIENTA DESCAFÉ

Esta herramienta diseñada por CENICAFÉ en el 2006, consta de un acople mecánico que va desprendiendo los frutos mediante un sistema de “desgranado” de café. Esta herramienta posee un accionamiento electro-mecánico que se alimenta mediante una guaya conectada al motor de combustión de una guadañadora. Esta herramienta presentó una masa de frutos verdes recolectados entre 16.5% a 14%.



Ilustración 9. Herramienta Descafé [36]

CANASTILLA

Esta herramienta de CENICAFÉ, consta de un recipiente en forma de jaula de ardilla al que ingresan los frutos de café a través de las rejillas que este posee. Esta herramienta fue diseñada en el 2016 para la recolección de frutos de café ubicados en el suelo del terreno cosechado, como una estrategia para el manejo de la broca.



Ilustración 10. Canastilla para la recolección de frutos de café [37]

MAQUINA UNAL - ANTIOQUIA

Este mecanismo es un prototipo de un trabajo de investigación desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Antioquia en el 2017. Este mecanismo consta de un sistema de vibración por escobillas que a medida que se desplaza a través del cultivo genera el desprendimiento de los frutos de café. Se estima que este sistema mecanizado puede obtener una eficiencia de hasta un 300% comparada con el método de recolección tradicional. Sin embargo, posee un costo inicial aproximado de \$45.000.000 y necesita de un operario para manipular constante el sistema.

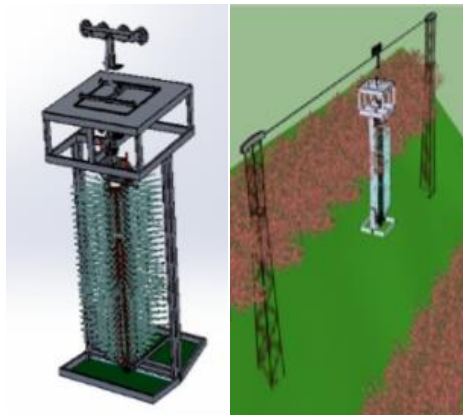


Ilustración 11. Prototipo de mecanismo de recolección de café [38]

5. MARCO TEÓRICO

5.1. GENERALIDADES DEL CAFÉ

5.1.1. Café

El café es un grano obtenido de plantas perennes tropicales (cafetos), de forma variable, el cual se usa principalmente para preparar y tomar como una infusión, cuando es tostado y molido. [4]

El café es la segunda mercancía más comercializada en el mundo, sólo detrás del petróleo. Aproximadamente 125 millones de personas viven del cultivo de café, esto incluye a los 25 millones de pequeños productores. La producción de café se estima en más de 151,6 millones de sacos anuales y su consumo en más de 400.000 millones de tasas al año. [5]

Brasil está posicionado como el mayor productor de café en el mundo, ya que además de contar con el primer puerto cafetero del mundo, el 63% de sus exportaciones son a causa del cultivo de café. Detrás de Brasil, se encuentran Vietnam y Colombia en el listado de mayores productores de café a nivel mundial. [5]



Ilustración 12. Producción de café en los principales países exportadores (2013/14 - 2016/17) [40]

Entre los principales importadores de café a nivel mundial se encuentra Estados Unidos, Alemania e Italia con volumen de importación aproximado mayor a los 500 millones de Kg anuales. [6]

Sin embargo, el país con el mayor consumo de café por persona al año es Finlandia, con un consumo aproximado de 12kg por persona al año. Seguido de Noruega e Islandia, con un consumo de 9,9 Kg y 9Kg respectivamente. [7]

Principales importadores de café del mundo en el año 2013			
Puesto	País	Importación (en millones de Kg)	Re-exportación (en millones de Kg)
1	Estados Unidos	1.620,96	194,88
2	Alemania	1.270,44	721,20
3	Italia	530,04	190,92
4	Japón	502,86	5,52
5	Francia	402,78	60,84
6	Bélgica	330,12	255,42
7	España	308,22	98,16
8	Canadá	271,20	60,36
9	Federación Rusa	259,74	33,24
10	Reino Unido	252,36	82,80
11	Países Bajos	204,42	106,86
12	Polonia	197,04	96,90
13	Suiza	160,02	92,82
14	República de Corea	128,46	22,86
15	Argelia	127,50	0,00
16	Malasia	117,42	86,40
17	Suecia	102,54	32,04
18	Australia	100,02	7,50
19	Austria	93,30	18,66
20	Ucrania	84,18	3,90

Ilustración 13. Principales importadores de café del mundo en el año 2013 [6]

Ahora refiriéndonos al caso particular de nuestro país, Colombia es el primer exportador mundial de café suave y tiene representación mundial a través de las tiendas Juan Valdez. Además tiene una de las más grandes variedades de cafés

especiales, ya que dependiendo de la región de cultivo, el sabor, color y aroma del café varían; muchos de estos cafés se consideran Premium dentro del mercado mundial y pueden ser bastante costosos. [5]

Esta particularidad del café colombiano se debe a la variedad de café cultivado en Colombia (Arábica), así como también al método de recolección utilizado. Pues al ser recolectado manualmente se garantiza un mayor desprendimiento de frutos maduros, de los cuales se obtiene un café de mejor calidad.

5.1.2. Cultivo

En la actualidad, existen más de 103 especies reconocidas de café, aunque sólo dos son responsables del 99% del comercio mundial: *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. Las cuales son originarias de África, sin embargo se han extendido a las zonas tropicales de los otros cuatro continentes. [4]

El café arábico (*Coffea arabica*) tiene una mayor vulnerabilidad a plagas y enfermedades, por lo que su adaptación ha sido mayor en las zonas subtropicales o tropicales de mayor altitud. Por otra parte, el café robusto (*Coffea canephora*) originario del África meridional, se ha adaptado a zonas bajas del trópico. [4]

La producción de café puede darse en altitudes de hasta dos mil metros sobre el nivel del mar en cercanías con la línea ecuatorial. En estas zonas de baja latitud y mayor altitud, la temperatura promedio en el año permite producir café de altísima calidad. Como es el caso de Colombia, donde se siembra en altitudes superiores a los mil metros sobre el nivel del mar. [4]

Factores adicionales a la altitud, como la temperatura, precipitación, brillo solar, humedad ambiental y propiedades del suelo también influyen en el cultivo. Por lo que, a pesar de que su origen es tropical, no todas las regiones del trópico son aptas para su cultivo. [4]

Regiones cafeteras de Colombia

Las condiciones ideales para el cultivo de café de 100% Arábica producido en Colombia se encuentran entre 1.200 y 1.800 metros de altura sobre el nivel del mar, con temperaturas templadas que oscilan entre 17 y los 23 grados centígrados, con precipitaciones cercanas a los 2.000 milímetros anuales. [4]

El clima en las zonas donde se produce café en Colombia no sólo se caracteriza por una altísima disponibilidad hídrica, evitando así el uso de riego artificial, sino unos ciclos de lluvias que generan en las plantaciones ciclos de cosecha

permanentes y, en consecuencia, disponibilidad de café fresco a lo largo de todo el año. [4]

Además de las condiciones especiales de altitud, latitud y clima, la caficultura colombiana cuenta con un atributo fundamental: la calidad de la tierra. Los suelos de las zonas cafeteras colombianas se caracterizan por ser en su mayoría derivados de cenizas volcánicas, lo que los dota de un alto contenido de material orgánico y buenas características físicas para la producción de café. [4]

La ubicación geográfica específica de cada región cafetera colombiana determina unas condiciones particulares de disponibilidad de agua, temperatura, radiación solar y régimen de vientos para el cultivo de grano garantizando un sabor y aroma particular, según su región de origen. [4]



Ilustración 14. Regiones cafeteras de Colombia [4]

Arreglos espaciales de los cafetales

Desde el punto de vista fisiológico de la eficiencia de la interceptación de la radiación solar, el arreglo espacial ideal es la equidistancia entre determinada parte de la planta y sus vecinos inmediatos. Sobre una base de área, esto permite la utilización más eficiente de los recursos y alcanzar las máximas producciones. Este arreglo es muy usado en cultivos perennes. [8]

En cultivos anuales es más frecuente cultivar en surcos, siendo la distancia entre surco mayor que la distancia entre las plantas en el surco. Cuando las plantas se distribuyen irregularmente, la eficiencia en la utilización del área total se reduce y en consecuencia, la producción de las plantas individuales también es irregular y menor. Mientras más irregular sea el espaciamiento, menor será la proporción de plantas individuales en producción dentro de los límites deseables. [8]

Departamento	Finca	Localización	Área	Variedad	Distancia de siembra (m x m)	Pendiente (%)
			(ha)			
Antioquia	A	C. Bolívar	1,8	Colombia	0,9 x 1,8	50 - 150
Caldas	B	Chinchiná	3,0	Colombia	1,0 x 1,0	0 - 15
	C*	Chinchiná	14,0	Colombia	1,2 x 1,3	0 - 100
	D*	Chinchiná	20,0	Colombia	Varias	0 - 80
	E	Manizales	3,4	Colombia	1,0 x 1,5	80 - 150
	F*	Manizales	6,0	Colombia	1,2 x 1,2	50 - 150
	G	Palestina	0,5	Colombia	1,0 x 1,5	0 - 80
	H	Palestina	2,8	Colombia	1,0 x 1,0	0 - 100
	Risaralda	I	Pereira	1,5	Caturra	1,0 x 1,3
Quindío	J	Pijao	0,9	Colombia	1,1 x 1,1	0 - 80
	K	Montenegro	3,3	Colombia	1,0 x 2,0	0 - 15
Valle	L	Ansermanuevo	0,8	Colombia	1,0 x 2,0	50 - 80
Cauca	M	Pindamó	3,3	Colombia	1,0 x 1,4	0 - 100

Ilustración 15. Arreglos espaciales de los cafetales colombianos. [53]

Siembra

De un trazado adecuado depende en gran medida la rentabilidad del cultivo, pues con él se pueden acelerar o frenar los procesos de erosión, así mismo mejorar las condiciones del cultivo para el aprovechamiento de la mano de obra durante la realización de las labores agronómicas como: fertilización, control sanitario y cosecha, entre otras. En los cultivos de café, los principales sistemas de trazado son: al cuadro o rectángulo, al triángulo y en curvas a nivel. [4]

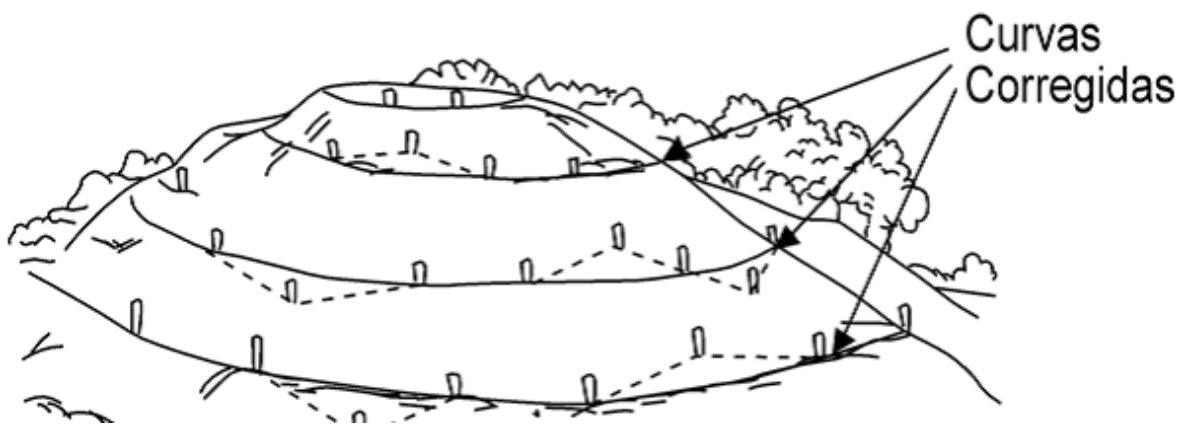


Ilustración 16. Trazado de cultivos en curvas de nivel [41]

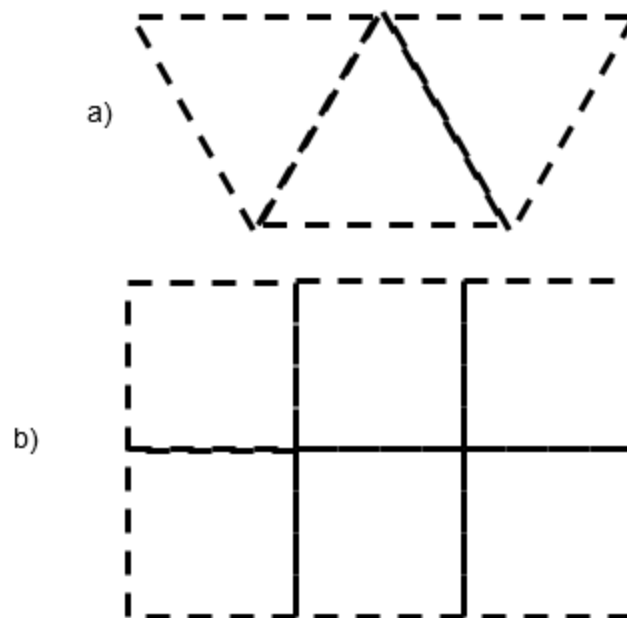


Ilustración 17. Trazado de cultivos en: a) Triángulo, b) Cuadrado o rectángulo

Producción

En las zonas cafeteras colombianas han sido identificadas áreas homogéneas en características geológicas, geográficas y climáticas denominadas ecotopos cafeteros, que definen las características principales del entorno de los sistemas de producción. Según la Federación Nacional de Cafeteros, se deben considerar los siguientes sistemas de producción: [4]

- **Sistema de producción tradicional**, está referido a un lote de café con variedad Caturra o Típica, sin trazo establecido, con sombrío no regulado y una población menor a 2.500 plantas por hectárea.
- **Sistema de producción tecnificado**, está referido a un lote de café con variedad Caturra o Castillo, con trazo establecido, con sombrío regulado o establecido al sol y una población mayor a 2.500 plantas por hectárea.
- **Sistema de producción con semisombra**, está referido a cultivos que emplean especies arbóreas con una densidad entre 20 y 50 árboles por hectárea, o cualquier especie arbustiva semipermanente con un número de plantas entre 300 y 750 sitios por hectárea.
- **Sistema de producción con sombra**, está referido a cultivos que emplean cualquier especie arbórea permanente con una densidad superior a 50 árboles por hectárea, o cualquier especie arbustiva semipermanente con más de 750 sitios por hectárea, con un arreglo espacial uniforme.



a. Sistema de producción tradicional



b. Sistema de producción tecnificado



c. Sistema de producción con semisombra



d. Sistema de producción con sombra

Ilustración 18. *Sistemas de producción de café en Colombia.*

a. [42] b. [4] c. [43] d. [44]

Cosecha

Los periodos de cosecha están asociados con la estacionalidad de las floraciones y de las particularidades del cultivo. En el caso de la especie de Café Arábica, la cosecha ocurre entre 210 y 224 días después de las floraciones. Las floraciones son inducidas cuando la planta sufre un estrés hídrico seguido de lluvias. Es así como países con estaciones de lluvias marcadas durante el año tienden a tener floraciones concentradas y, consecuentemente, cosechas concentradas en un periodo relativamente corto, de alrededor de tres meses, en el año. [4]

La concentración en los periodos de cosecha favorece prácticas de recolección con el uso de maquinaria más o menos sofisticada, que, en cualquier caso, implica la recolección de frutos en óptimo estado de madurez, con frutos que pueden estar sobremaduros o ligeramente inmaduros. [4]

En el cultivo de café se utilizan principalmente dos métodos de recolección

- **Picking:** se refiere al proceso de recolección netamente manual, en el que las cerezas maduras se seleccionan y recogen una a una, lo que exige a los recolectores recorrer el cultivo varias veces, pero produce una cosecha de alta calidad más homogénea. [9]
- **Stripping:** se refiere al proceso manual o mecanizado, en el que los frutos se recolectan todos de una vez cuando están más o menos maduros. A menudo requiere una comprobación posterior para eliminar impurezas y cerezas inmaduras o ya fermentadas. [9]




a. Picking




b. Stripping

Ilustración 19. *Métodos de recolección de café.* a. [45] b. [46] [47]



<p>Aumenta la calidad de los frutos cosechados.</p> <p>Disminuye el daño al cafeto.</p> <p>Reduce costos de postcosecha</p> <p>Disminuye pérdida de frutos caídos al suelo.</p> <p>No posee inversión inicial en infraestructura.</p>	<p>Aumenta tiempo de recolección.</p> <p>Incrementa costo de cosecha.</p> <p>Baja eficiencia en cafetales con un número muy elevado de hectáreas cosechadas.</p>
---	--

Ilustración 20. Ventajas y desventajas del picking [Autor]



<p>Disminuye el tiempo de recolección.</p> <p>Disminuye costo de cosecha.</p> <p>Disminuye de manera considerable la pérdida de frutos caídos al suelo.</p> <p>Alta eficiencia en cafetales con un número muy elevado de hectáreas cosechadas.</p>	<p>Aumenta el daño al cafeto.</p> <p>Disminuye la calidad de los frutos cosechados.</p> <p>Aumenta costos de postcosecha.</p> <p>Alta inversión inicial en infraestructura.</p> <p>Requiere adecuación previa del terreno y capacitación de operarios.</p>
--	--

Ilustración 21. Ventajas y desventajas del stripping [Autor]

5.1.3. Árbol

Se le conoce como cafeto o planta productora de café a un arbusto que se da en la región tropical de la tierra perteneciente a la familia de las rubiáceas. Abarca 500 géneros y 8.000 especies. Uno de esos géneros es el Coffea, que lo constituyen árboles, arbustos, y bejucos, y comprende unas 10 especies civilizadas, es decir, cultivadas por el hombre y 50 especies silvestres. [4]

Se sabe que la Coffea arabica y Coffea robusta son las dos principales especies de café de importancia comercial en el mundo. Estas dos especies se diferencian por su forma, condiciones de crecimiento y desarrollo, composición química, gusto, sabor y aroma. Las bebidas preparadas con café Arábico se caracterizan por tener más acidez, cuerpo medio y un aroma afrutado, mientras que el café Robusta es más fuerte y amargo, y contiene más cafeína. Entre los principales productores de café Robusta están Brasil, Vietnam, Indonesia y Uganda. Por su parte, Colombia, Etiopía, México y Centroamérica son grandes productores de Café Arábigo. [4]

Arábica

- Se desarrolla entre los 900 y 2000 metros de altitud.
- Su fruto se cae al madurar.
- Florece después de la lluvia.
- Contiene 0,8 – 1,5% de cafeína.
- Contiene 8% de azúcares.
- Posee un sabor ácido.
- Su fruto es de forma alongada.
- Posee un cuerpo suave y aromático.



Ilustración 22. Café Arábica [49]

Robusta

- Se desarrolla entre los 400 y 900 metros de altitud.
- Su fruto no se cae al madurar.
- Florece de manera irregular.
- Contiene 1,7 – 3,5% de cafeína.
- Posee un sabor amargo.
- Su fruto es de forma redonda.
- Posee un cuerpo fuerte y poco aromático.



Ilustración 23. Café Robusta [50]

Se distinguen también otras variedades de café provenientes de la mezcla de las dos especies principales: Arábica y Robusta. Entre las que podemos encontrar:

THE PERIODIC TABLE OF Coffee Varieties
(Actually, cultivars. Coffee cultivars are any variety produced by horticulture or agricultural techniques, therefore cultivated. Below are the major international cultivars. See our website for more information.)

Arabica															Robusta	
Gesha ¹															Canephora ²	
Typica ¹ Bourbon ¹															Mauritania ² Liberica ²	
French Mission ¹	N39 ¹	Mayaguez ¹	Arusha ¹	Jackson ¹	K20 ¹	Kenya Selected ¹	SL35 ¹	Acaia ⁴	Mundo Novo ³	Hibrido de Timor ³	Icatti ¹	Devamachy ¹	Laurina ¹			
Pointu ¹	Impetivus ¹	Caturra ¹	Sumatra ¹	Bergendal ¹	Bume Sudan ¹	Amarelo de Botucatu ¹	Blawan Paumah ¹	Java ¹	Mocha ¹	Arla ¹	Bogor Prada ¹	Kallmas ¹	Kawisari ¹			
SL34 ¹	Tekic ¹	Pacas ¹	Mokka ¹	Arabigo ¹	Sao Bernardo ¹	Pluma Hidalgo ¹	Garodang ¹	Chickamaqui ¹	Creole ¹	S26 ¹	S228 ¹					
Ethiopian Harrar ¹	Criollo ¹	Kent ¹	Maragojipe ¹	Pache Comin ¹	Villa Lobos ¹	Blue Mountain ¹	Villa Sarchi ¹	Catimor ⁴	Rasina ¹					(Not yet named)		
Ethiopian Sidamo ¹	Ethiopian Yirgacheffe ¹	San Ramon ¹	Sidikalang ¹	Pache Colls ¹	Ouro Verde ¹	Catuai Garnica ¹	Sarchimor ¹	Pacamaru ¹	Maracatu ¹					Chimera ⁵		

1: Interspecific Hybrid
2: Original Variety
3: Subvariety
4: Intraspecific Hybrid
5: Mutation

©2011 The Coffee Co-Mission™, LLC. Visit <http://CoffeeCo-Mission.com> for more educational and marketing coffee articles.

Ilustración 24. Tabla de variedades de café [48]

5.1.4. Fruto

Los granos de café o semillas están contenidos en el fruto del arbusto, los cuales en estado de madurez toman un color rojizo y se les denomina "cereza". Cada una de ellas consiste en una piel exterior que envuelve una pulpa dulce. El fruto del cafeto cuyas semillas tostadas y molidas se utilizan para el consumo humano está compuesto, de afuera hacia dentro, por: [4]

- Una cubierta exterior llamada pulpa.
- Una sustancia gelatinosa azucarada que recibe el nombre de mucílago.
- Una cubierta dura que se denomina pergamino o cáscara.
- Una cubierta más delgada y fina llamada película.
- Y finalmente el grano o almendra que es la parte del fruto que, una vez tostada y molida, se utiliza para la producción de la bebida del café.

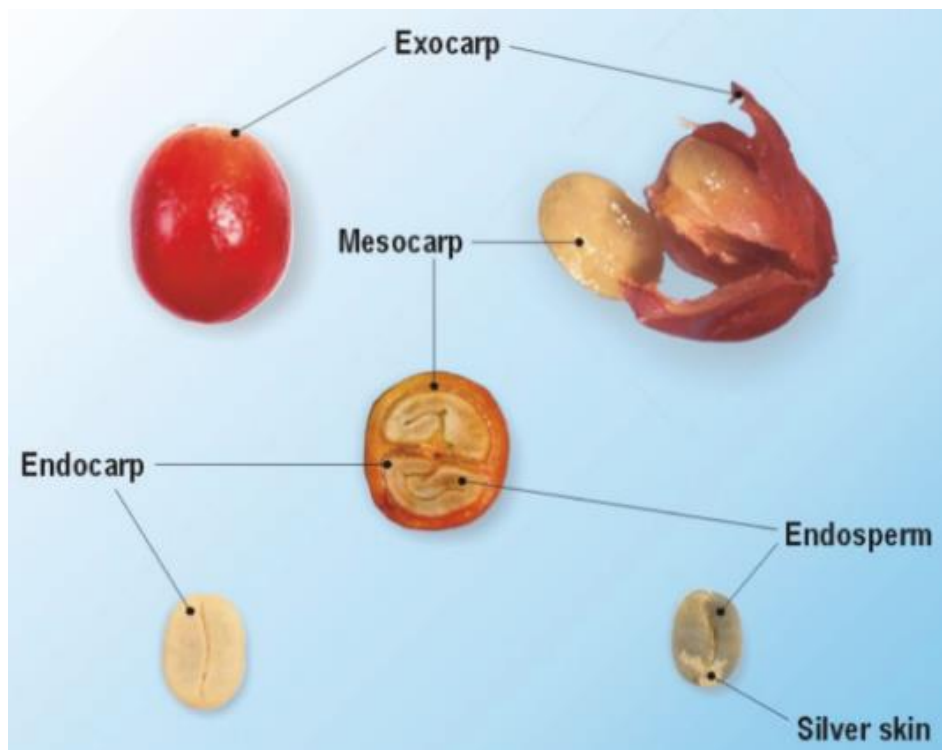


Ilustración 25. Composición del fruto de café. [4]

Del resultado de la unión del grano de polen con el óvulo se forman el fruto y las semillas. En el desarrollo del fruto del café se pueden distinguir cuatro periodos: [4]

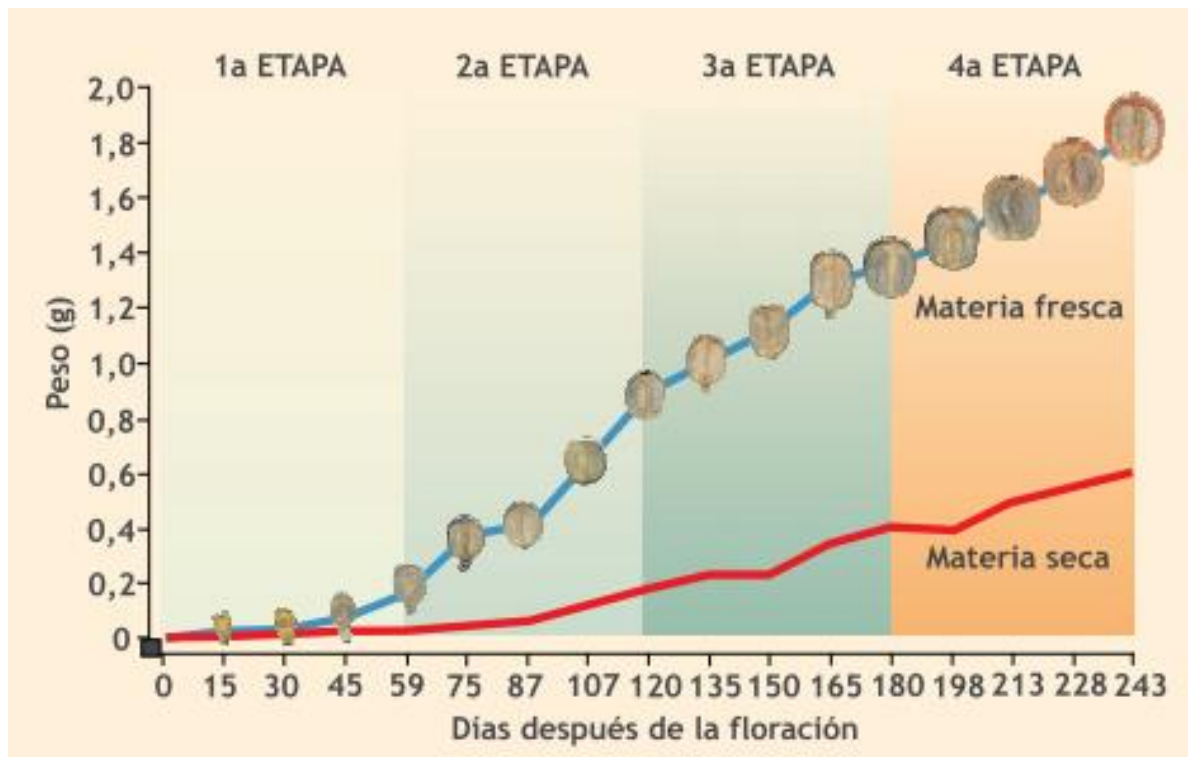


Ilustración 26. Etapas de desarrollo del fruto de café. [8]

Primer periodo:

- Es una etapa donde hay muy poco crecimiento en tamaño y peso del fruto.
- Va desde la fecundación hasta la sexta semana.

Segundo periodo:

- En esta etapa el fruto crece rápidamente en peso y volumen.
- Se necesita el agua, de lo contrario el grano se queda pequeño, hay secamiento, caída de frutos y se presenta el "grano negro".
- Va desde la sexta a la décima sexta semana después de la fecundación.

Tercer periodo:

- Se da una gran demanda de nutrientes.
- Se endurece la almendra.

- Si falta agua, el fruto no termina de formarse bien y se produce el grano averanado.
- Va de la décima sexta a la vigésima séptima semana después de la fecundación.

Cuarto periodo:

- Es la época de maduración o cambio de color del fruto.
- Va de la vigésima- séptima a la trigésima- segunda semanas después de la fecundación.

5.2. TECNOLOGÍA AGRÍCOLA

El uso de las tecnologías en la agricultura determina en gran medida la competitividad de unos agricultores frente otros. El uso de la tecnología en la agricultura asegura la productividad y beneficia al conjunto del país por los trabajos indirectos que crea. [10]

5.2.1. Mecanización agrícola

La mecanización cubre todos los niveles de la producción y de las tecnologías de procesado agrícolas, desde simples herramientas de mano hasta el equipo motorizado más sofisticado. [11]

Así mismo, esta facilita y reduce el trabajo pesado, alivia la falta de mano de obra, mejora la productividad y oportunidad de las operaciones agrícolas, mejora el uso eficiente de los recursos, fortalece el acceso a mercados y contribuye a la mitigación de amenazas derivadas del clima. También puede contribuir significativamente al desarrollo de cadenas de valor y sistemas alimentarios, ya que tiene el potencial de hacer que las actividades y funciones de postcosecha, procesamiento y comercialización sean más eficientes, eficaces y favorables al medio ambiente. [11]

Los trabajos de investigación realizados a nivel mundial en procesos agrícolas se han enfocado en las etapas de **recolección de cosechas**, y en la clasificación y ordenamiento de los productos agrícolas.

Para poder emplear la mecanización agrícola en algún cultivo **este debe estar preparado para esta tecnología**, la cual consta de maquinaria grande, robusta y con un alto rendimiento, pero es muy sujeta a las características topológicas y a los arreglos espaciales del cultivo.



Ilustración 27. Cosechadora industrial. [35]

5.2.2. Cosecha asistida

La cosecha asistida consiste en la implementación de equipo portátil por parte de operarios especializados, con el fin de optimizar la recolección de café a través de diversas herramientas de apoyo. Estas herramientas van desde simples sistemas de apoyo a la captación de frutos hasta herramientas de accionamiento vibratorio para el desprendimiento de los frutos.

Las herramientas de apoyo a la cosecha de café están diseñadas para aumentar la eficiencia en la tarea de retirar el fruto del árbol, reducir la mano de obra a implementar y facilitar la tarea de recolección en terrenos de mayor dificultad topológica.

A pesar del importante desarrollo en herramientas de apoyo a la recolección de café durante las últimas dos décadas, la presencia de estas herramientas en el sector cafetero es precaria, dado que la población se encuentra renuente a la implementación de dichas alternativas, consecuencia del alto costo de inversión y la necesidad de una reestructuración de sus cultivos.

De igual manera, se han presentado dificultades debido a la ausencia de mano de obra capacitada para la manipulación de las herramientas e implementación de los nuevos métodos de cosecha planteados.



Ilustración 28. Cosecha asistida de café. [51]

5.2.3. Agricultura de precisión

La agricultura de precisión (AP) se define como un conjunto de tecnologías que buscan optimizar la producción agrícola a través del manejo de la variabilidad (espacial y temporal) de los factores de producción del cultivo. [12]

Estas tecnologías se instalan en la maquinaria de campo (según la labor en un tractor-implemento, cosechadora e incluso en un vehículo de tracción) para ejecutar de una forma más detallada las labores de levantamiento topográfico, nivelación, preparación, surcado, siembra mecanizada, fertilización y cosecha, dependiendo de las características dentro de un lote. [12]



Ilustración 29. Aplicaciones de la agricultura de precisión. [52]

5.3. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA

5.3.1. Teoría de simulación

La simulación se define como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo una serie de pruebas sobre este, con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema. [13]

La implementación de una simulación es conveniente cuando no existe el sistema real, como en el caso de este proyecto. Este problema es muy común en el ámbito de la ingeniería de desarrollo de nuevos sistemas. El diseño del sistema mejora notablemente cuando se cuenta con un modelo adecuado para realizar experimentos. [14]

En la actualidad, la simulación presta un servicio invaluable en gran número de áreas, como lo son: procesos de manufactura, plantas industriales, sistemas públicos, sistemas de transportes, construcción, diseño, educación, capacitación, entre otros. [14]

De estos, se destacan varios tipos de simulación según la naturaleza del modelo empleado: [15]

- **Identidad:** Cuando el modelo es un réplica exacta del sistema en estudio.
- **Cuasi-identidad:** Se utiliza una versión ligeramente simplificada del sistema real.
- **Laboratorio:** Se utilizan modelos bajo las condiciones controladas de un laboratorio. Se pueden distinguir dos tipos:
 - **Juego operacional:** Personas interactúan entre sí mientras se toman datos para construir la simulación.
 - **Hombre-Máquina:** Se estudia la relación entre las personas y la máquina.
- **Simulación por computador:** Se usa un modelo simbólico, implementado en lenguaje computacional. Esta simulación puede ser a su vez:
 - **Digital**
 - **Analógica**

En el desarrollo de una simulación se pueden distinguir las siguientes etapas:



Ilustración 30. Etapas de una simulación [54]

Existen varios tipos de sistemas a modelar, definiendo sistema como una sección de la realidad que es el foco primario de un estudio. Los cuales según su naturaleza pueden ser: [16]

- **Determinístico:** Es un sistema que no contiene ningún elemento aleatorio. En este tipo de sistema, las variables de salida e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada.
- **Estocástico:** Es un sistema que contiene una conducta aleatoria. Por lo que, para entradas conocidas no es posible determinar las posibles salidas.
- **Continuo:** Se da cuando las relaciones funcionales entre las variables del sistema sólo permiten que el estado evolucione en el tiempo en forma continua.
- **Discreto:** Se da cuando las relaciones funcionales del sistema sólo permiten que el estado *varíe* en un conjunto finito de puntos temporales.

Cuando se realiza una simulación se experimenta con un modelo para obtener ciertos resultados. Un modelo es también un sistema, y de acuerdo al tipo de variables de salida del modelo el modo de simulación será: [14]

- **Análisis:** Las variables de salida del modelo representan las variables del sistema real. Es usado para estimar la respuesta del sistema real ante entradas especificadas.
- **Diseño:** Las salidas del modelo representan a los parámetros del sistema real. El objetivo es determinar los parámetros para los cuales el sistema produciría las salidas deseadas.

- **Control:** Las variables de salida del modelo representan a las variables de entrada del sistema real. Es usado para determinar los valores que deberán adoptar las entradas del sistema para producir los resultados deseados.

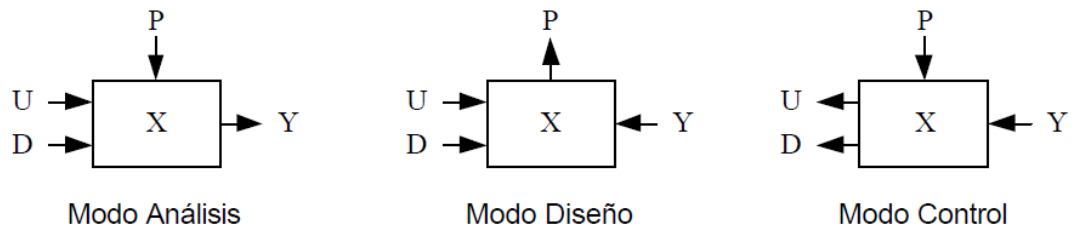


Ilustración 31. Modos de simulación [14]

5.3.2. Propiedades físicas del café

El desarrollo de investigaciones enfocadas en nuevas herramientas y técnicas de recolección dirigidas a incrementar los indicadores de eficiencia y calidad en la cosecha mecanizada, es un tema de gran importancia en la actualidad.

Durante el desarrollo de estas investigaciones, fue necesaria la determinación de las propiedades físico-mecánicas de los frutos y del sistema fruto-pedúnculo. Esto se debe a que el conocimiento de estas propiedades es requerido para la simulación del sistema fruto-pedúnculo del café, mediante el uso de software de análisis por elementos finitos. Para el desarrollo de una simulación más acertada se hizo necesario el estudio de las propiedades tanto físico-mecánicas, como geométricas de los frutos y pedúnculos.

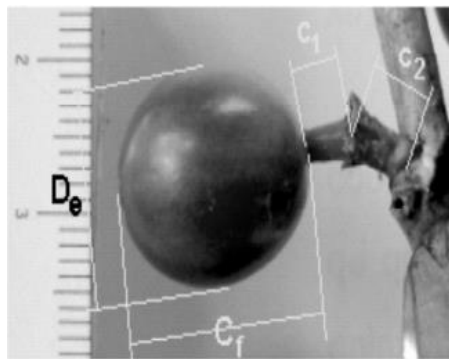


Ilustración 32. Dimensiones contempladas de los frutos y pedúnculos [55]

Propiedades	Media		Desviación Standard		Error de la Media	
	Maduros	Verdes	Maduros	Verdes	Maduros	Verdes
Diámetro medio del pedicelio (d_1), mm	2,0377 (4,09%)*	1,9542	0,2588	0,4213	0,1106 (5,66%)	0,0061 (0,31%)
Diámetro medio del pedúnculo (d_2), mm	2,8183 (2,65%)	2,7434	0,4838	0,4967	0,1304 (4,75%)	0,0085 (0,31%)
Longitud del pedicelio (C_1), mm	4,0354 (14,27%)	3,4594	0,7271	0,6495	0,1706 (4,93%)	0,0145 (0,42%)
Longitud del pedúnculo (C_2), mm	4,9021 (7,89%)	4,5152	0,8419	0,8192	0,2171 (4,76%)	0,0231 (0,51%)
Diámetro ecuatorial del fruto (D_1), mm	14,1186 (21,44%)	11,0906	0,7372	3,4965	0,9182 (8,27%)	0,4216 (3,80%)
Longitud de los frutos, (C_3), mm.	15,6381 (14,68%)	13,3420	0,6495	3,2161	0,8445 (6,33%)	0,3566 (2,67%)
Masa de los frutos (M_1), gr.	1,752 (35,78%)	1,125	0,024	0,138	0,0048 (0,27%)	0,0275 (2,45%)
Densidad de los frutos, (ρ), gr/cm ³	1,168 (1,19%)	1,154	0,016	0,142	0,0032 (0,27%)	0,028 (2,45%)
Momento de inercia centroidal de los frutos, kg.m ²	5,904x10 ⁻⁸ (71,27%)	1,696x10 ⁻⁸	(Calculado)	-	-	-
Módulo de Elast. de los pedúnculos (E), N/m ²	1,5886x10 ⁷ (70,19%)	4,7344x10 ⁶	7,274x10 ⁶	2,988x10 ⁶	2,91x10 ⁶ (18,32%)	1,14x10 ⁶ (23,99%)
Coefficiente de Poisson (ν), adim.	0,3191	0,3457 (7,69%)	0,0900	0,0721	0,0409 (11,8%)	0,0884 (27,69%)
Módulo de Cortante (G), N/m ²	6,0215x10 ⁶ (70,78%)	1,7590x10 ⁶	(Calculado)	-	-	-
Momento de Desprendimiento (M), N.m	2,3007	4,5125 (49,01%)	2,0110	2,6807	0,2755 (11,97%)	0,3733 (8,27%)

Ilustración 33. Estadígrafos de las propiedades físico-mecánicas de los frutos y pedúnculos [55]

Además de contemplar las dimensiones geométricas anteriormente ilustradas del fruto y el pedúnculo, también resultaron necesarias las dimensiones geométricas de la rama del cafeto. Así mismo, las propiedades físico-mecánicas de la madera del cafeto fueron requeridas para la simulación. Los datos anteriormente mencionados fueron obtenidos de:

Variable	Maracay						El Rosario					
	3 años			4 años			3 años			4 años		
	LimI/1	X/2	LimS/3	LimI	X	LimS	LimI	X	LimS	LimI	X	LimS
LP	4,4	4,4	4,4	4,6	4,7	4,8				4,5	4,6	4,7
LF	16,7	16,8	16,9	16,5	16,6	16,8				16,4	16,5	16,7
AF	15,9	15,9	16,0	15,7	15,7	15,7				15,2	15,2	15,3
GF	13,9	13,9	13,9	13,7	13,7	13,7				13,9	13,9	13,9
PF	45,9	46,3	46,7	44,0	44,2	44,4				42,7	43,1	43,5
AL	195,4	196,8	198,2	210,0	218,3	220,0	179,0	180,3	181,7	214,6	217,2	219,7
DA	152,4	153,8	155,3	158,7	157,2	158,9	150,3	151,7	153,1	149,3	150,8	152,3
NC	45,2	45,6	45,9	54,0	54,4	54,5	42,5	42,8	43,2	53,5	53,9	54,4
NNR	19,9	20,1	20,2	22,1	22,3	22,5	20,7	20,9	21,0	22,8	23,0	23,2
LR	67,6	68,0	68,5	66,4	66,5	66,8	66,0	66,5	66,9	67,9	68,4	68,9
LE	3,3	3,3	3,3	2,8	2,8	2,9	3,2	3,2	3,2	3,1	3,1	3,1
AR	26,9	27,5	28,0	26,2	26,4	26,6	28,9	29,4	29,9	24,7	25,2	25,6
AH	34,3	34,5	34,7	35,8	35,9	36,0	34,3	34,5	34,7	33,0	33,2	33,4
ARH	34,2	34,4	34,5	33,2	33,2	33,3	33,1	33,2	33,3	29,7	29,9	30,0

LP = Longitud del pedúnculo, LF = Longitud del fruto, AF = Ancho del fruto, GF = Grosor del fruto, PF = Peso del fruto, AL = Altura, DA = Diámetro, NC = Número cruces, NNR = Número nudos rama, LR = Longitud rama, LE = Longitud entrenudos, AR = Ángulo inserción rama, AH = Ángulo inserción hoja, ARH = Área de la hoja

/1 = Límite inferior /2 = Media aritmética /3 = Límite superior

Ilustración 34. Propiedades geométricas del cafeto y sus frutos en dos edades y dos localidades [56]

TROZA	Colombia Rojo	CV**	Caturra Rojo	CV**	Colombia Amarillo	CV**
Superior	24,23a*	69,9	18,64a	70,2	8,59a	49,0
Media	4,38b	17,2	4,39b	11,6	4,62b	10,7
Inferior	3,93b	19,8	3,77b	7,9	3,95b	22,1

Ilustración 36. Módulo de Young de la madera de café [63]

Traits	<i>C. arabica</i>	<i>C. canephora</i>	With:
Δ	820	760	Δ : density of the wood (in kg/m ³)
E	7500	9500	E : the specific modulus of elasticity (in Megapascals – MPa - i.e. in Newtons per mm ²)
Er	9	13	Er : the specific modulus of elasticity - the ratio of the modulus (E) to the density (ρ).

Ilustración 35. Propiedades físico-mecánicas de la madera del cafeto [57]

5.3.3. Métodos de desprendimiento del fruto de café

El cultivo de café arábico se caracteriza por presentar diferentes estados de maduración durante el periodo de cosecha, lo que genera un alto grado de dificultad a las tareas de mecanización de la cosecha. Por lo que se han planteado diversos métodos de desprendimiento de café a través de los años, con el fin de seleccionar el mejor método de desprendimiento de café, fue necesario estudiar los distintos

métodos de desprendimiento del fruto de café existentes. De lo cual se encontraron tres métodos distintos:

- **Desprendimiento del fruto de café por vibración**

Estudios recientes de la cosecha selectiva de café mediante la aplicación de vibraciones indican la necesidad de aplicar al sistema fruto-pedúnculo frecuencias de excitación significativamente altas, del orden de los 150-200Hz. Es conocido que cuando se le ejerce una excitación armónica a un cuerpo, al cesar el periodo transitorio y establecerse el movimiento estacionario, las salidas del sistema asumen la misma frecuencia de la excitación. En este principio se basa el sistema de desprendimiento de fruto de café por vibración. [17]

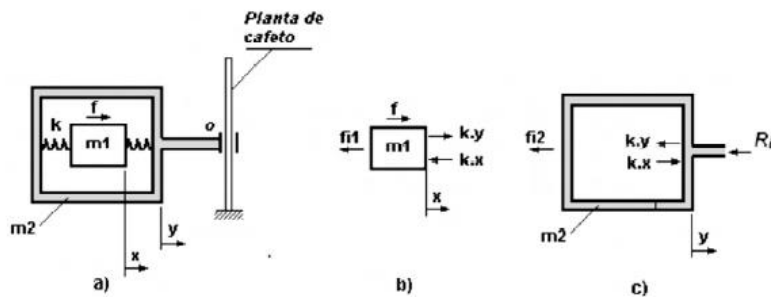


Ilustración 37. Esquema ideal del vibrador inercial aplicado a una planta de café [17]

- **Desprendimiento del fruto de café por fuerza de desprendimiento**

Se han desarrollado múltiples herramientas basadas en el principio de la aplicación de una fuerza o momento de desprendimiento para el desprendimiento del fruto de café. Este método de desprendimiento consiste en la aplicación de una fuerza paralela al pedúnculo o un momento flector en el pedúnculo para desprender el fruto del café, como se ilustra a continuación:



Ilustración 38. Medición de la fuerza de desprendimiento usando un dinamómetro [58]

Algunos datos de las fuerzas de desprendimiento experimentales aplicadas al fruto del cafeto se muestran a continuación:

	Yield	Detachment force	
		Mature	Green
Minimum	0.68	4.91	9.34
1° Quartile	1.78	6.25	9.89
Median	2.45	6.84	10.19
Mean	2.72	6.86	10.15
3° Quartile	3.65	7.49	10.40
Maximum	6.49	8.35	10.96
Kurtosis	0.314	-0.833	0.006
Skewness	0.833	-0.075	-0.229
Variance	1.849	0.854	0.124
Standard deviation	1.361	0.915	0.349
Variation coefficient (%)	50.00	13.32	3.44

Ilustración 39. Análisis de la fuerza de desprendimiento de frutos maduros y verdes [58]

- **Desprendimiento del fruto de café por fuerza de espetación**

Espetar se define como la acción de introducir a través de un cuerpo un instrumento puntiagudo. Este principio fue aplicado al desprendimiento de frutos de café en un estudio de manera experimental con el objetivo de analizar la viabilidad de la espetación de frutos para la recolección mecanizada de café. A continuación, se ilustran más claramente método de espetación del fruto:

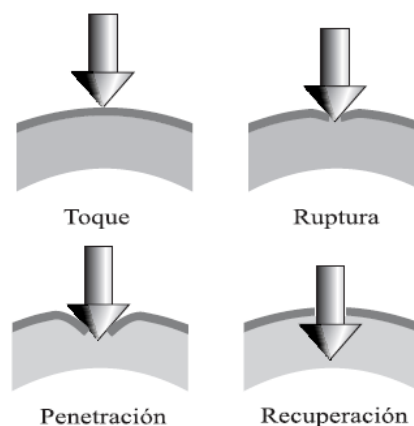


Ilustración 40. Penetración del interfase cáscara-mucilago de frutos de café con un punzón de cabeza cónica [60]

A continuación, se ilustran los datos de la fuerza de espelación necesaria para penetrar el fruto y la fuerza de desprendimiento necesaria para obtener el fruto mediante el punzón:

Punzón	Estado	F_E (N)	S (N)	C.V. (%)
Alfiler	Maduros	0,63	0,12	18,7
	Inmaduro	2,11	0,40	19,1
Tachuela	Maduros	0,64	0,15	23,8
	Inmaduro	2,67	0,57	21,4

Ilustración 41. Promedio de la fuerza de espelación [60]

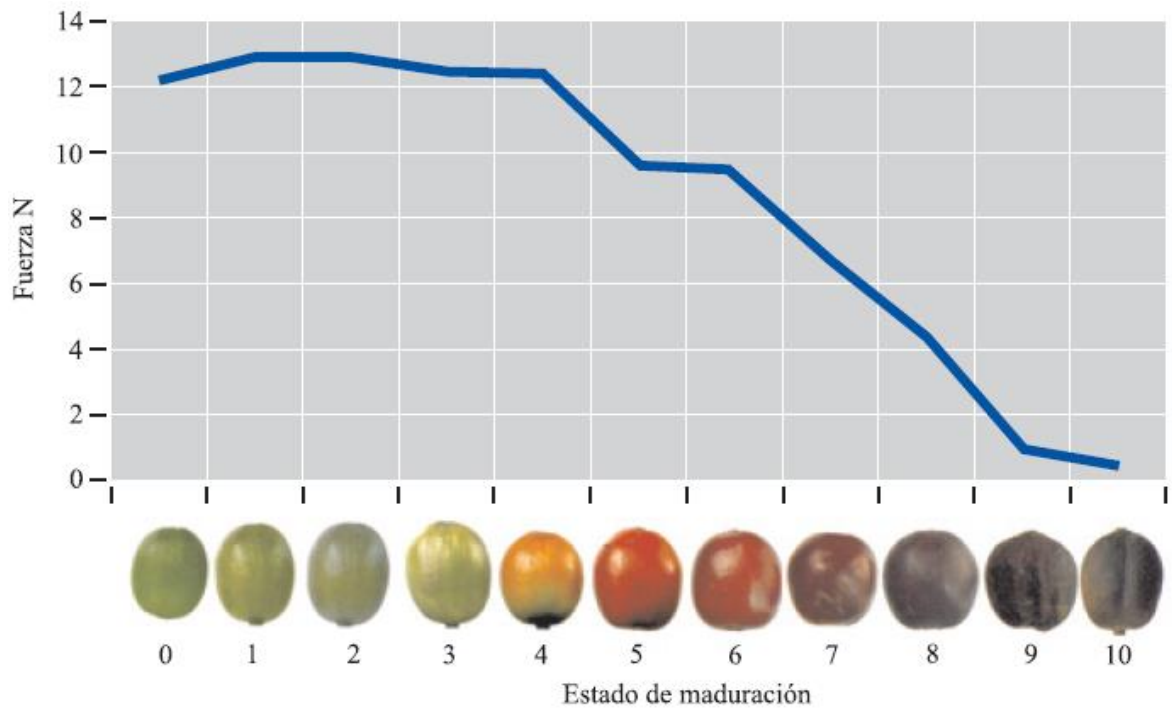


Ilustración 42. Fuerza de desprendimiento de frutos de café por espelación [60]

5.4. FUNDAMENTOS DEL DISEÑO MECATRÓNICO

El diseño de sistemas mecatrónicos propuesto por Didier Casner, es una metodología para el diseño, desarrollo y optimización de sistemas multidisciplinares. Es una herramienta de desarrollo enfocada en la optimización de sistemas multidisciplinares que intenta esquematizar el proceso de desarrollo de productos mecatrónicos.

El proceso de diseño de sistemas mecatrónicos propuesto por Didier Casner, está basado en la metodología de diseño de modelo V. Posee cuatro fases: **Definición y especificación, Modelamiento, Optimización, Validación**. De estas fases dos de ellas hacen parte de la metodología modelo V (fases externas) y las otras dos son un aporte de optimización multidisciplinario realizado por Didier Casner.

El enfoque de optimización multidisciplinario adoptado por Casner fue la razón principal para seleccionar esta metodología, ya que uno de los factores importantes del desarrollo de este proyecto es la optimización del diseño a desarrollar con el fin de obtener un prototipo más robusto y con mejor desempeño.

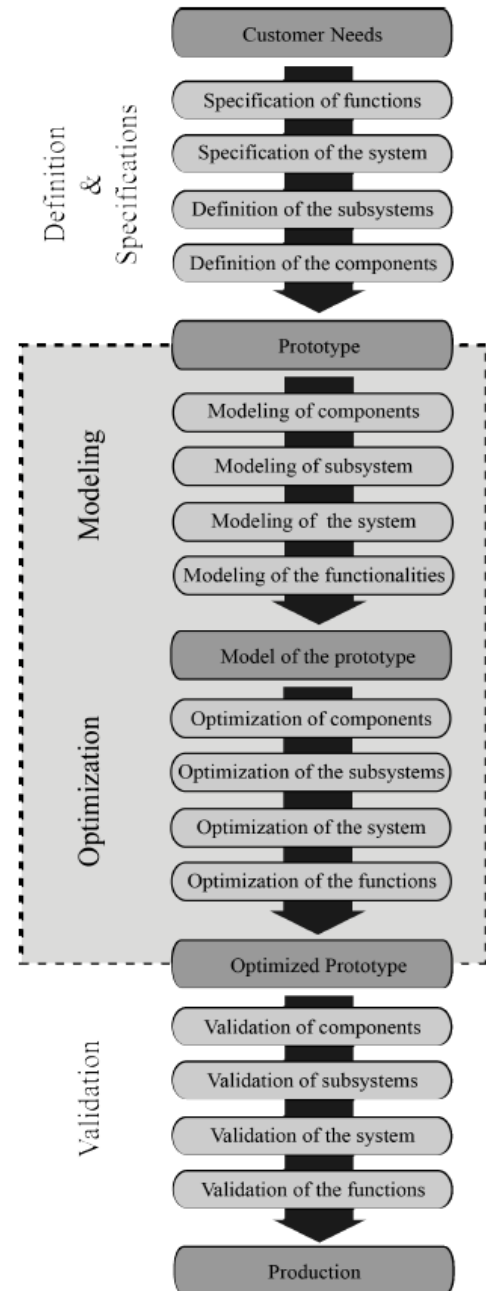


Ilustración 43. Metodología de diseño de sistemas mecatrónicos [39]

En la primera etapa de la metodología seleccionada, se abarcan cinco puntos importantes:

- Necesidad del usuario.
- Especificación de funciones.
- Especificación del sistema.
- Definición de subsistemas.
- Definición de componentes.

Las necesidades del usuario y especificación de funciones fueron obtenidas mediante la aplicación de la metodología APTE. La especificación del sistema y definición de subsistemas se logró aplicando la metodología QFD a distintas soluciones técnicas planteadas.

La metodología APTE sirvió para encontrar los criterios de evaluación usados para comparar las diferentes soluciones técnicas con la metodología QFD. Para el planteamiento de las soluciones técnicas se aplicó la metodología FAST con el fin de determinar las posibles soluciones, ante cada función principal planteada la metodología APTE.

5.4.1. Metodologías aplicadas

Las metodologías de evaluación implementadas para encontrar los subsistemas de accionamiento y sensado, así como la morfología de herramienta que mejor satisfacía las necesidades para la cosecha asistida fueron:

Metodología APTE

Es una metodología francesa de diseño y desarrollo de productos creada por la empresa APTE, inspirada en los principios de análisis de valor del autor Larry Miles. Esta metodología tiene como objetivo conseguir que el producto se ajuste mejor a las necesidades del usuario para lograr un aumento de la calidad, por otra parte también se busca reducir el costo del producto para conseguir mayor utilidad. [18]

Hay varios mecanismos de análisis en la metodología APTE, entre los que se encuentran: el diagrama de análisis de la necesidad, el diagrama de análisis funcional de la necesidad y el diagrama funcional de diagnóstico de costos.

Los principios básicos de la metodología APTE son: [19]

- Definir los problemas como objetivos a lograr.
- Obtener un marco de referencia consensuado entre los responsables del proyecto.

- Lograr objetividad para evitar la comparación entre soluciones.
- Fomentar la creatividad para encontrar diferentes soluciones.

Para ello se utilizan dos diagramas, el primero sintetiza la necesidad y el objetivo del producto a desarrollar, y el segundo encuentra los criterios de evaluación de las alternativas de solución planteadas.

El primer diagrama conocido como: diagrama de análisis de la necesidad, consta de las siguientes partes:

- ¿Quién usa el producto?
- ¿Cuál es el producto?
- ¿Sobre qué actúa el producto?
- ¿Objetivo del producto?

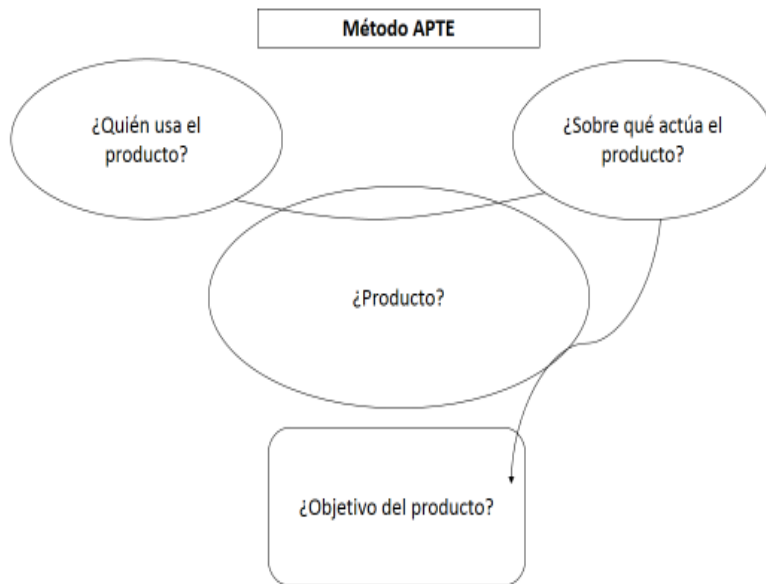


Ilustración 44. Diagrama de análisis de la necesidad (Toro) [Autor]

El segundo diagrama, llamado: diagrama de análisis funcional de la necesidad, está constituido por los siguientes elementos:

- Elementos de medio externo
- Producto
- Funciones de servicio que se dividen en:
 - Funciones principales (FP)
 - Funciones restrictivas (FC)

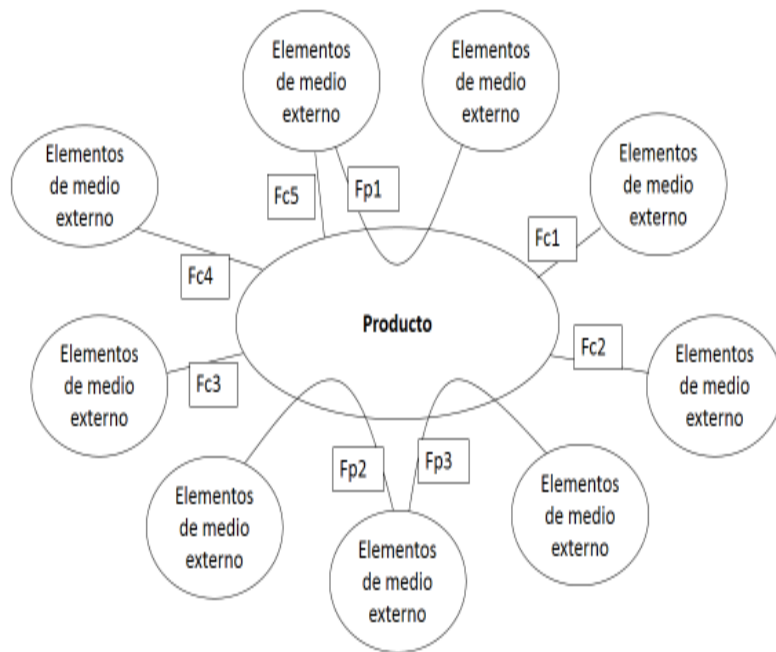


Ilustración 45. Diagrama de análisis funcional de la necesidad (Pulpo) [Autor]

Las funciones principales y las funciones restrictivas se convierten en criterios de evaluación para la aplicación de la metodología QFD. [18]

Metodología FAST

El diagrama FAST (Técnica de Análisis Funcional de Sistemas) es una técnica de calidad que se enfoca mayormente en la ingeniería de valor, analizando los costos. Se utiliza para analizar la estructura funcional de un sistema técnico. Mediante este método se despliegan y separan las funciones del producto dividiéndose en elementos manejables y así, poder ser tratados individualmente. [20]

La importancia de la metodología FAST se fundamenta en que muestra gráficamente las dependencias funcionales y crea un proceso para estudiar los vínculos entre funciones al tiempo que explora opciones para crear sistemas mejorados.

El modelo FAST tiene una orientación horizontal conocida como la dimensión COMO-PORQUE. Esta dimensión es descrita de esta forma porque se realizan las preguntas COMO y PORQUE al crear la estructura lógica del sistema de funciones.

Empezamos con una función y preguntamos COMO esa función es realizada hasta llegar a una solución técnica específica. Esta forma de pensar y preguntar es leída

de izquierda a derecha. Para abstraer el problema a un nivel superior, nos preguntamos PORQUE esa función es realizada.

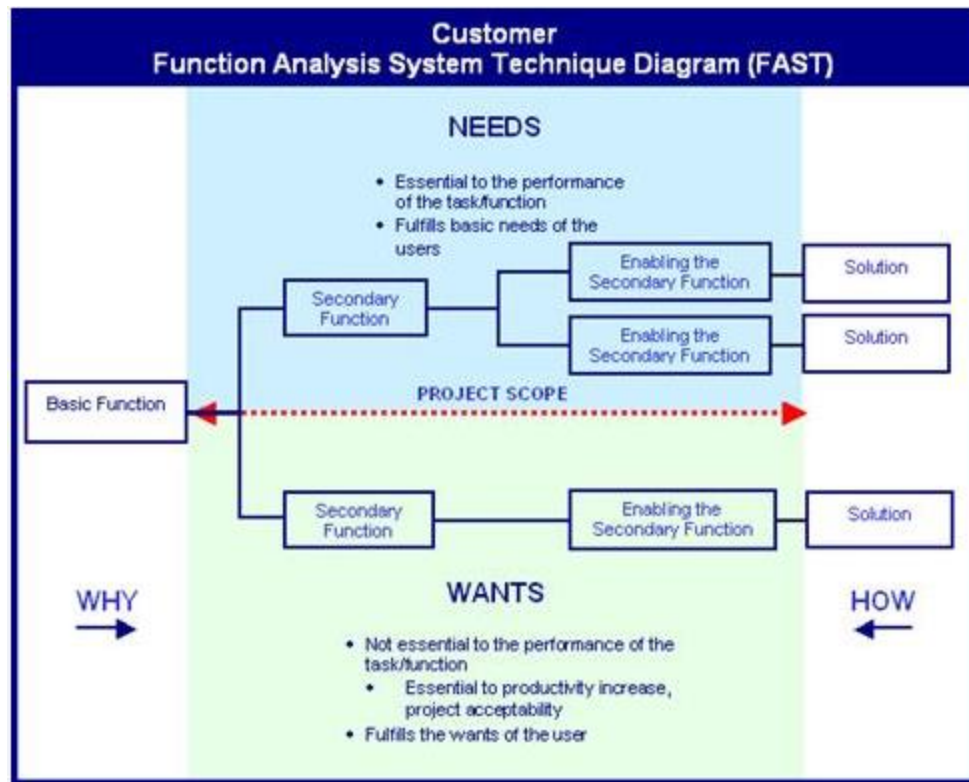


Ilustración 46. Diagrama FAST [20]

Las soluciones técnicas encontradas se convierten en las alternativas a evaluar durante la aplicación de la metodología QFD.

Metodología QFD

Despliegue de la función de calidad (QFD), es una metodología japonesa usada en la gestión de calidad con el fin de seleccionar una alternativa u opción que mejor se acomode a las necesidades o demandas del usuario.

Esta metodología es ampliamente usada en técnicas que se derivan de este concepto, tales como: casa de calidad, selección de conceptos Pugh y despliegue de la función modular. [21]

La metodología QFD se implemente siguiendo la siguiente secuencia de pasos:

1. Definición del objetivo: Identificación de los objetivos del cliente y el objetivo establecido evaluador.

2. Los qué: Identificación de las características del producto o del servicio deseado por el cliente.
3. Los cómo: Identificación de las formas de lograr los qué.

Estos pasos son aplicados a través de las diferentes fases secuenciales del ciclo de desarrollo de producto: diseño, fabricación, mantenimiento, etc.

Para cada fase se usa una matriz con el fin de mapear las características deseadas (los qué) con las opciones para lograr estas características (los cómo), como se muestra en la siguiente figura: [22] [23]

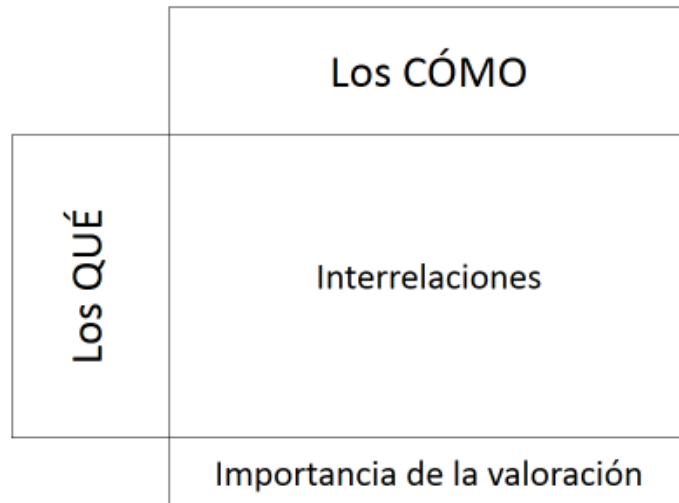


Ilustración 47. Matriz de implementación de funciones de calidad (QFD)
[Autor]

6. METODOLOGÍA

Basados en la metodología de diseño mecatrónico seleccionada, se planteó un conjunto de actividades para dar lugar al desarrollo del proyecto, con el fin de dar cumplimiento a cada objetivo.

1. Definir el problema, analizar la necesidad y especificar las funciones del sistema.
2. Buscar bibliografía acerca de herramientas de apoyo a la recolección de café, así como generalidades acerca del cultivo, producción, cosecha y postcosecha del café.
3. Evaluar las alternativas de herramientas de recolección de café existentes, teniendo en cuenta la fuente de alimentación, tipo de actuadores, método de desprendimiento del fruto, tamaño y portabilidad de la herramienta. Dicha selección se realiza con la aplicación de la metodología QFD.
4. Selección de los subsistemas de accionamiento y sensado de la herramienta, a partir del diseño mejorado de la alternativa seleccionada.
5. Modelar la herramienta electro-mecánica aplicando los conocimientos adquiridos en el área de modelamiento de sistemas. Para ello se realizará el modelo estático y dinámico de la interacción de los cuerpos durante el desprendimiento del fruto.
6. Simular distintos escenarios de desprendimiento del fruto de café, variando materiales, dimensiones y ángulo de ataque de la herramienta. Para lo cual se utilizará el software COMSOL®. La simulación pretende analizar los esfuerzos a los que se somete el fruto por acción de la herramienta, así mismo busca analizar la fuerza de desprendimiento necesaria para desprender el fruto ante distintas geometrías de la herramienta. Se usarán todas las propiedades físicas reales de cada componente de la simulación, con el fin de aproximar la simulación tanto como sea posible al prototipo a construir.
7. Realizar el diseño conceptual de la herramienta, especificando el subsistema mecánico y el eléctrico. Definiendo los componentes específicos de cada subsistema.
8. Realizar la optimización del diseño mecánico basado en una parametrización previa de la herramienta mediante la implementación de varios prototipos con parámetros variados. El criterio de optimización principal será mejorar la calidad del café recolectado, es decir, disminuir el número de frutos verdes recolectados al mínimo. El objetivo de optimización será definido durante el desarrollo de la parametrización de la herramienta (4).
9. Realizar el diseño del sistema de electrónica de potencia, donde se contemple todos los circuitos electrónicos necesarios para el funcionamiento de la herramienta.

10. Realizar los planos de construcción del prototipo y la lista de materiales necesarios, seguido de la construcción del prototipo de la herramienta.
11. Validar los componentes específicos del prototipo, seguida de la validación de los subsistemas. Para finalmente, validar el sistema y sus funciones.

Diagrama de flujo de la metodología:

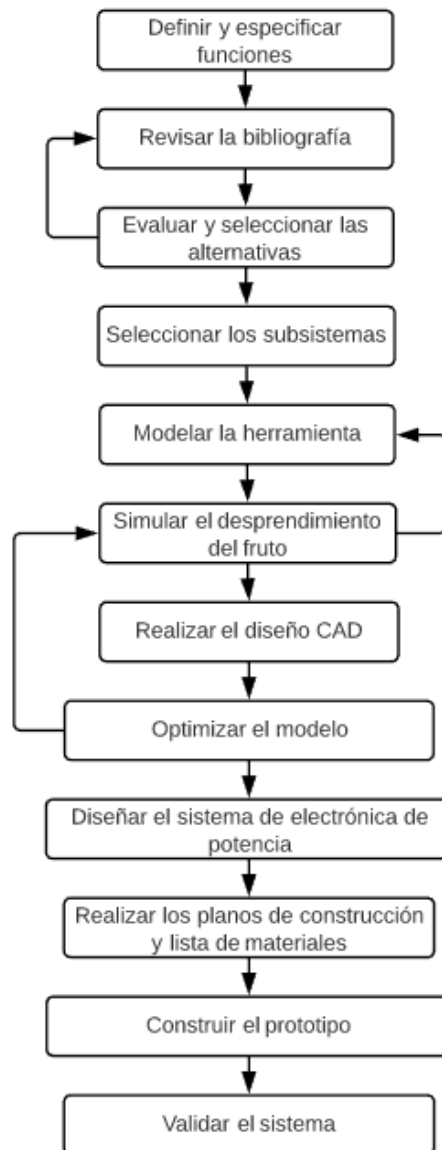


Ilustración 48. Metodología de diseño de sistemas mecatrónicos aplicada al proyecto [Autor]

6.1. DEFINICIÓN Y ESPECIFICACIÓN

En el desarrollo de la primera etapa de la metodología seleccionada, se abarcaron cuatro puntos importantes:

- Necesidad del usuario.
- Especificación de funciones.
- Especificación del sistema.
- Definición de subsistemas.

Aplicando las respectivas metodologías anteriormente mencionadas, se obtuvieron los siguientes resultados para cada punto a tratar:

- **Necesidad del usuario:** Basándose en la convocatoria de Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [24] y visitas técnicas realizadas a la Hacienda el Roble situada en la Mesa de los Santos, Santander, se determinó la problemática base para el desarrollo de la plataforma móvil para la cosecha asistida de café.



Ilustración 49. Visita técnica a la sala de control de calidad de la Hacienda el Roble. (De izq. a der.) S. Roa, B. Ruiz, O. Rueda, J. Hernández.

- **Especificación de funciones:** La metodología APTE se usó para determinar las necesidades y requerimientos de diseño, conceptualizar el problema y determinar los factores que interactúan con la plataforma móvil. Por lo que se obtuvo:

Diagrama de análisis de la necesidad de la herramienta

Este diagrama pretende relacionar los factores que intervienen en la identificación de la necesidad, tales como: ¿A quién se le presta el servicio? ¿Cuál es el producto? ¿Sobre qué actúa? ¿Cuál es el objetivo del producto? Obteniendo así:

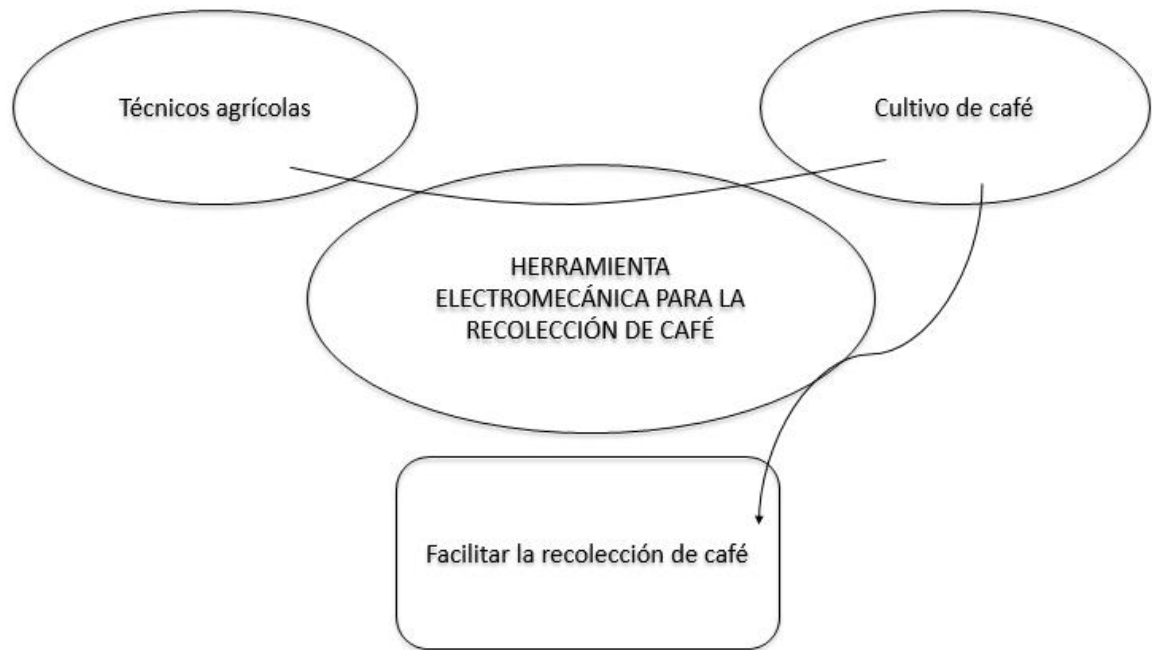


Ilustración 50. Diagrama de análisis de la necesidad de la herramienta electromecánica [Autor]

Teniendo en cuenta los siguientes elementos de medio externo basados en la convocatoria de Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [24] y visitas técnicas realizadas a la Hacienda el Roble situada en la Mesa de los Santos, Santander, se elaboró el diagrama de análisis funcional de la necesidad:

- Madurez del fruto: Se busca que la herramienta recolecte el menor número de frutos verdes posibles, ya que se pretende generar un diseño que se caracterice por la calidad del café recogido y no por su velocidad de trabajo.
- Grado de afectación: Se busca que el sistema de accionamiento de la herramienta no posea acciones bruscas o genere un daño residual en la herramienta.

- **Tamaño:** Se busca que la herramienta tenga un tamaño moderado a fin de no generar posibles daños en el café, así como también para que pueda maniobrar con facilidad entre las ramas.
- **Terreno:** Se busca que la herramienta sea usada en cualquier tipo de terreno, por lo que se pretende disminuir el peso de la herramienta.
- **Control:** Se busca que la herramienta sea de fácil uso, que no necesite un conocimiento complejo para su uso.
- **Costo:** Se busca que la herramienta sea de bajo costo, con el fin de tener una gran acogida entre los caficultores.
- **Rendimiento:** Se busca que la herramienta sea capaz de superar la velocidad de recolección manual, sin disminuir la calidad del café cosechado.

Considerando los parámetros previos, se construyó el siguiente diagrama:

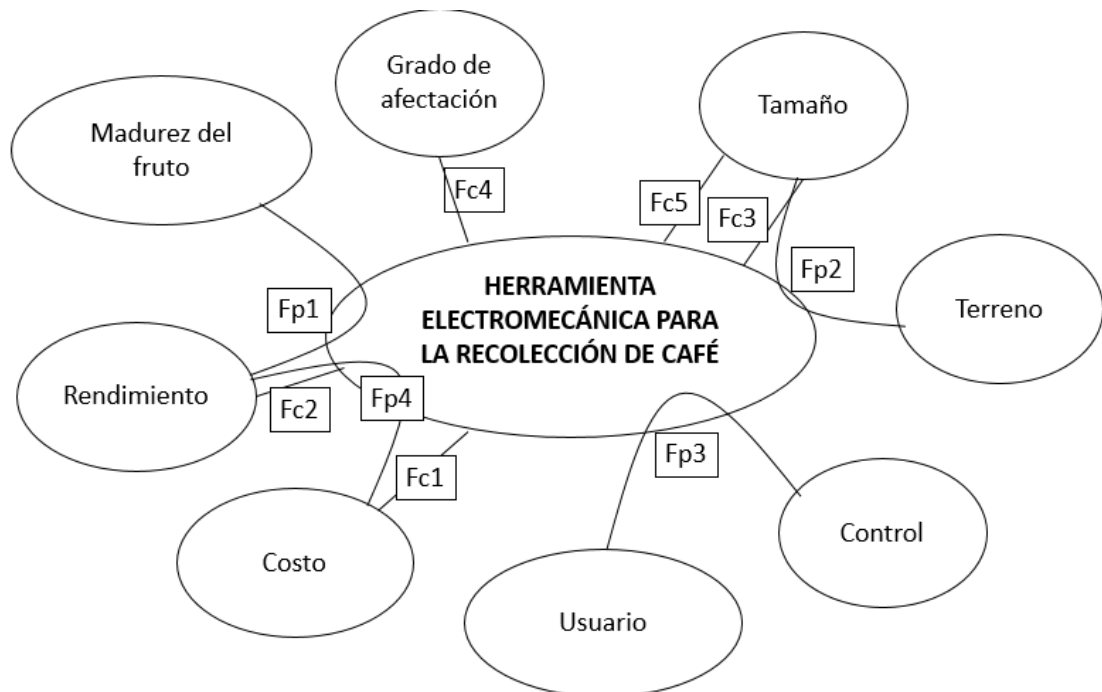


Ilustración 51. Diagrama de análisis funcional de la necesidad de la herramienta electromecánica [Autor]

Criterios encontrados para evaluar cada morfología y subsistema:

Fp1 = Mejorar la calidad de recolección.

Fp2 = Adaptabilidad al terreno.

Fp3 = Implementar un sistema de control.

Fp4 = Optimizar el diseño de la herramienta con el objetivo de mejorar la calidad.

Fc1 = Reducir costos de fabricación.

Fc2 = Reducir tiempo de recolección con respecto al tiempo de recolección por método manual.

Fc3 = Facilitar el mantenimiento.

Fc4 = Disminuir daño a la planta

Fc5 = Adaptabilidad a la planta.

- **Especificación del sistema:** La metodología FAST se usó para determinar las soluciones técnicas ante cada función principal planteada en el diagrama de análisis de la necesidad. Esto con el fin de diseñar un sistema cuyos subsistemas individuales suplan una necesidad particular y no diseñar un sistema que pretenda suplir una sola necesidad mientras sus subsistemas sólo contribuyen a un objetivo en común.

En el diagrama FAST se tomaron como necesidades cada una de las funciones principales de la herramienta electromecánica, con el fin de dar cumplimiento al mayor número de necesidades posibles, que para este caso son:

- Fp1 = Mejorar la calidad de recolección.
- Fp2 = Adaptabilidad al terreno.
- Fp3 = Implementar un sistema de control.
- Fp4 = Optimizar el diseño de la herramienta con el objetivo de mejorar la calidad.

Por lo que se plantearon funciones técnicas cada vez más específicas ante cada necesidad, hasta llegar a una o varias soluciones técnicas medibles y evaluables para cada necesidad. De lo cual se obtuvieron los siguientes diagramas FAST:

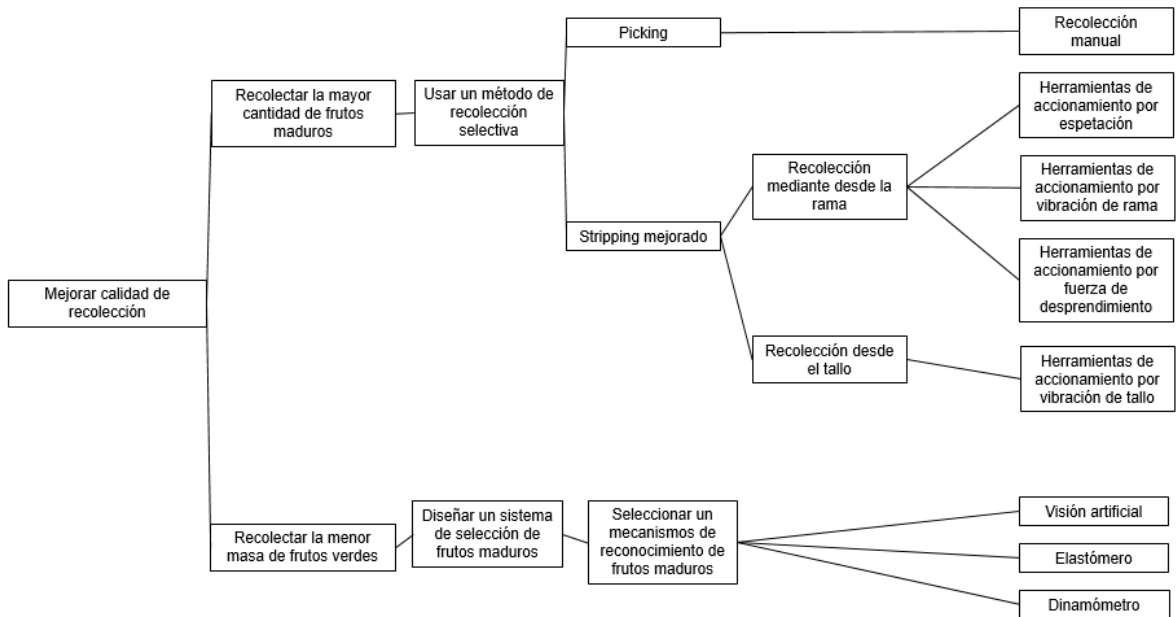


Ilustración 52. Diagrama FAST para mejorar la calidad de recolección [Autor]

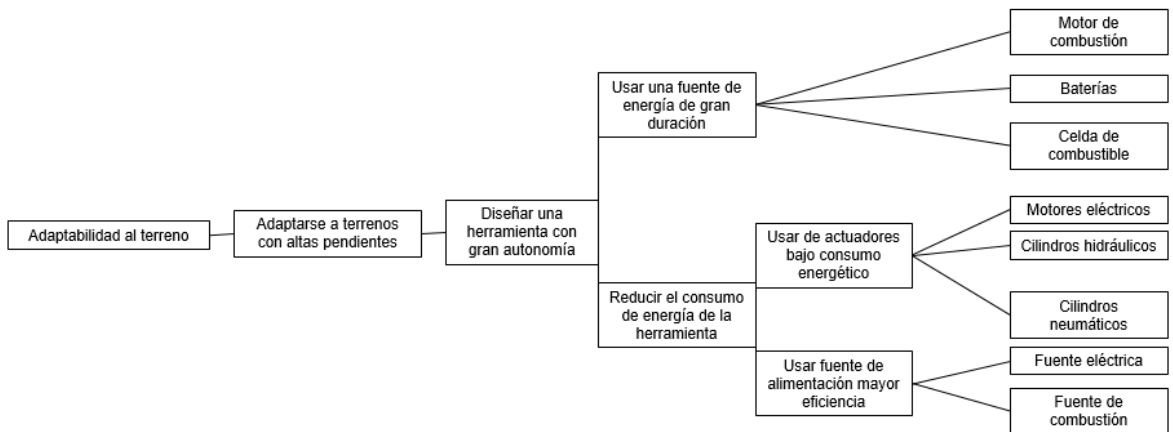


Ilustración 53. Diagrama FAST para adaptabilidad al terreno [Autor]

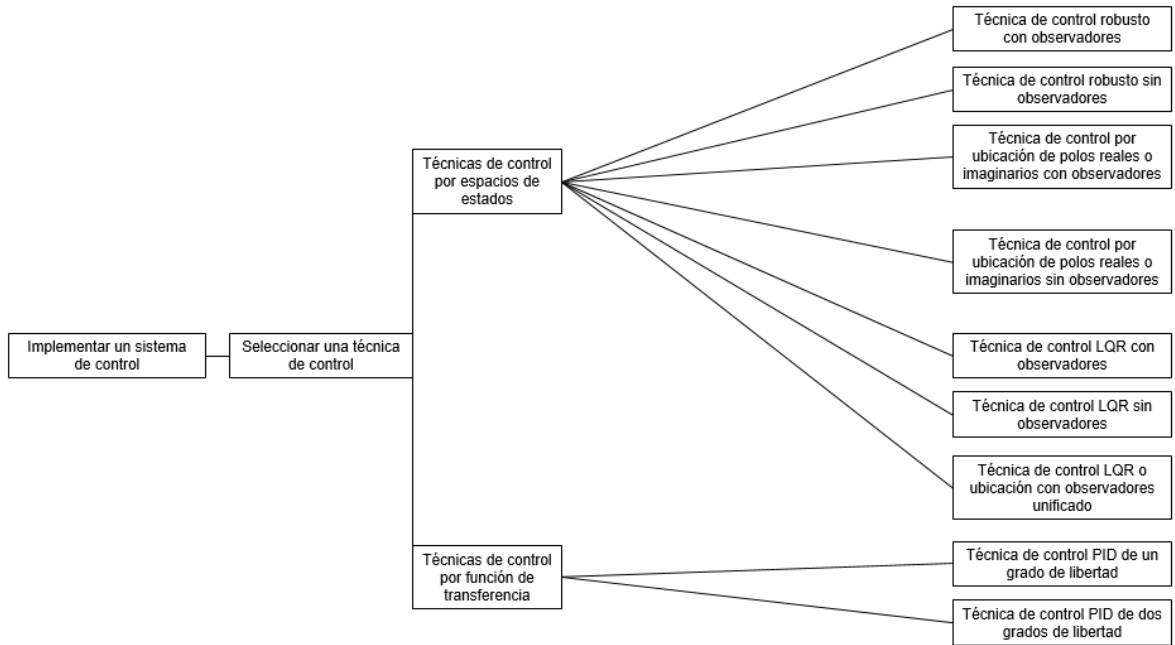


Ilustración 54. Diagrama FAST para implementar un sistema de control [Autor]

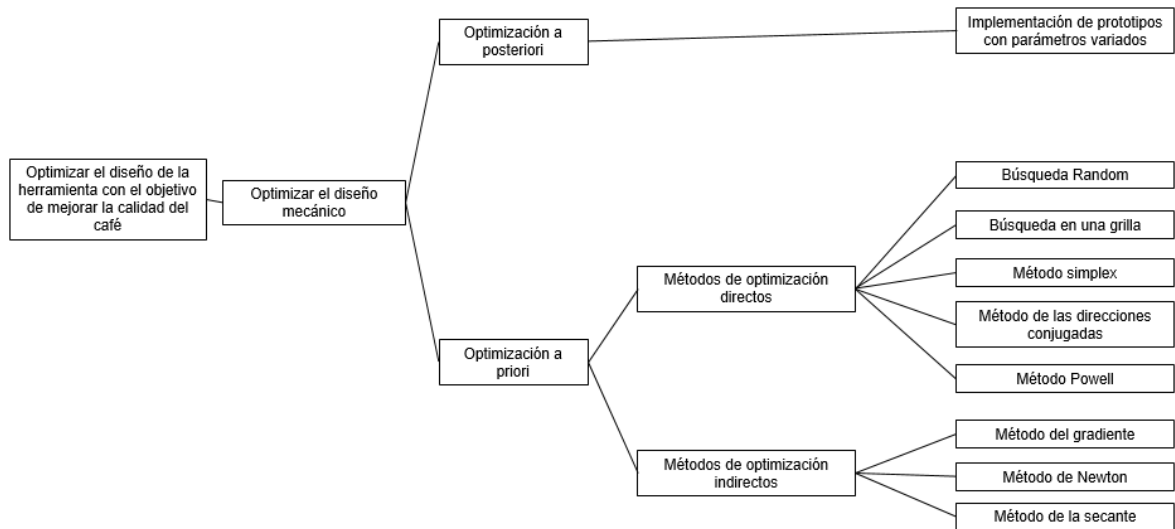


Ilustración 55. Diagrama FAST para optimizar el diseño de la herramienta [Autor]

- **Especificación de subsistemas:** La metodología QFD se usó para seleccionar los subsistemas más adecuados al problema planteado, a través de una casa de calidad que correlaciona las necesidades o requerimientos planteados con las soluciones técnicas de cada función principal.

En el QFD todos los criterios fueron ponderados según su importancia relacionada con el cumplimiento de la necesidad, por lo que se consideró en orden de relevancia:

1. Calidad de café. (5 puntos)
2. Adaptabilidad a la planta. (4,5)
3. Adaptabilidad al terreno, optimización del diseño, daño a la planta. (4 puntos)
4. Sistema de control, costo de fabricación, tiempo de recolección. (3,5 puntos)
5. Mantenimiento. (3 puntos)

Aplicando la metodología se obtuvieron las siguientes casas de calidad evaluando las soluciones técnicas obtenidas para cada función principal:

Mejorar la calidad del café											
Criterios	Valor de necesidad	Método de recolección					Soluciones técnicas	Mecanismo de selección			Soluciones técnicas
		Recolección manual	Accionamiento por vibración de rama	Accionamiento por espesitación	Accionamiento por fuerza de desprendimiento	Accionamiento por vibración de tallo		Dinamómetro	Elastómero	Visión artificial	
Calidad de café	5	9	3	9	9	1	3	9	9		
Adaptabilidad al terreno	4				9		9	9	3		
Sistema de control	3,5		9	9	9		3	9	1		
Optimización del diseño	4										
Costo de fabricación	3,5		3	9	9	1	9	3	1		
Tiempo de recolección	3,5	3	9	1	9	9	3	9	3		
Mantenimiento	3		3	9	9	3	9	3	3		
Daño a la planta	4	9	3	9	3	1	9	9	9		
Adaptabilidad a la planta	4,5		9	1	3	9	3	3	1		
Necesidades		91,5	150	179	192	93,5	180	213	124		

Ilustración 56. Diagrama QFD para mejorar la calidad del café [Autor]

Adaptabilidad al terreno								
	Valor de necesidad	Tipos de fuentes			Soluciones técnicas	Tipos de actuadores		
		Motor de combustión	Baterías	Celda de combustible		Eléctricos	Hidráulicos	Neumáticos
Crterios								
Calidad de café	5				9	3	9	
Adaptabilidad al terreno	4	9	3	3	9	3	3	
Sistema de control	3,5	3	3	9	9	9	9	
Optimización del diseño	4							
Costo de fabricación	3,5	9	3	1	9	1	3	
Tiempo de recolección	3,5				9	3	9	
Mantenimiento	3	3	9	3	3	1	3	
Daño a la planta	4	3	3	9	9	1	3	
Adaptabilidad a la planta	4,5	3	3	1	9	3	9	
Necesidades		113	86	96,5	261	93	192	

Ilustración 57. Diagrama QFD para adaptabilidad al terreno [Autor]

6.2. MODELADO

El modelado es el proceso de construcción de un modelo a partir de un sistema real establecido. Para ello, se sugirió un modelo simplificado de la herramienta basados en los subsistemas anteriormente seleccionados.

Se realizó el modelamiento del sistema paralelo al desarrollo de la simulación, es por ello que primero expone la parametrización del modelo. Por lo cual, se determinó durante esta etapa los parámetros variables que fueron usados posteriormente para el análisis de la simulación y la optimización del sistema a partir de la variación de dichos parámetros.

6.2.1. Parametrización del modelo

Para la parametrización del modelo se tuvieron en cuenta diversos parámetros variables que podrían influir en el funcionamiento de la herramienta, esta

parametrización se basó en observaciones de las visitas de campos realizadas y el artículo de investigación desarrollado por el autor en conjunto con un equipo de trabajo sobre el análisis cinemático de la recolección manual de café. Los principales parámetros de análisis en el diseño y optimización de la herramienta fueron, basados en el siguiente modelo base:

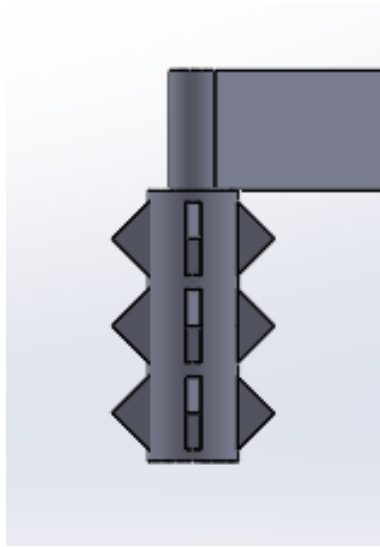


Ilustración 58. Modelo CAD base para la parametrización [Autor]

- **Material de los dientes**

El material que se ha escogido para el diseño de la herramienta es el elastómero, esto por su gran capacidad de trabajo en la zona de deformación elástica y su capacidad de rigidez cuando se acerca a la deformación plástica.

Elastómero significa simplemente caucho, las principales características de este tipo de materiales son: [25]

- 1) Capacidad de ser clasificado con alargamientos moderados y que, al retirar la tensión, el material vuelva su estado original.
- 2) Procesable en forma de colada a altas temperaturas.
- 3) Ausencia de fluencia o plastodeformación (deformación permanente) significativo.

Las principales familias de elastómeros tienen las siguientes clasificaciones y características principales: [25]

- Estirénicos (SBCS)
 - Compresión a temperatura ambiente
 - Resistente a la rotura
 - Alta elasticidad
 - Antideslizante
 - Baja dureza

- Olefínicos (TPO o TPE-O)
 - Gran alargamiento
 - Resistente a la rotura
 - Alta elasticidad
 - Antideslizante
 - Baja dureza

- Vulcanizados termoplásticos (TPVS o TPE-V)
 - Compresión a alta temperatura
 - Resistente a la fatiga
 - Antideslizante
 - Relajación de tensión a largo plazo

- Poliuretano termoplástico (TPUS o TPE-U)
 - Alta resistencia a la abrasión
 - Alta dureza
 - Compresión a bajas temperaturas

- Copoliésteres (COPES o TPE-E)
 - Alta resistencia al desgaste
 - Alta estética de la superficie
 - Buena capacidad de recuperación
 - Buena resistencia térmica

- Copoliámidas (COPAS o TPE-A)
 - Alta resistencia y dureza
 - Baja densidad
 - Resistencia química
 - Resiliencia

Luego de analizar las condiciones de operación del material y los requerimientos mecánicos, se optó por trabajar con poliuretano termoplástico por su alta resistencia a la abrasión y su alta dureza. Una alta dureza en el caso del elastómero implica un mayor rango de durezas posibles, ya que se pueden fabricar en durezas inferiores a la del material.

- **Forma de los dientes**

La forma de los dientes influye directamente en el área de contacto entre los dientes de la herramienta y el fruto, así como en la distribución de la fuerza en el fruto. Es por ello que se plantearon tres alternativas de dientes para el desarrollo del diseño:

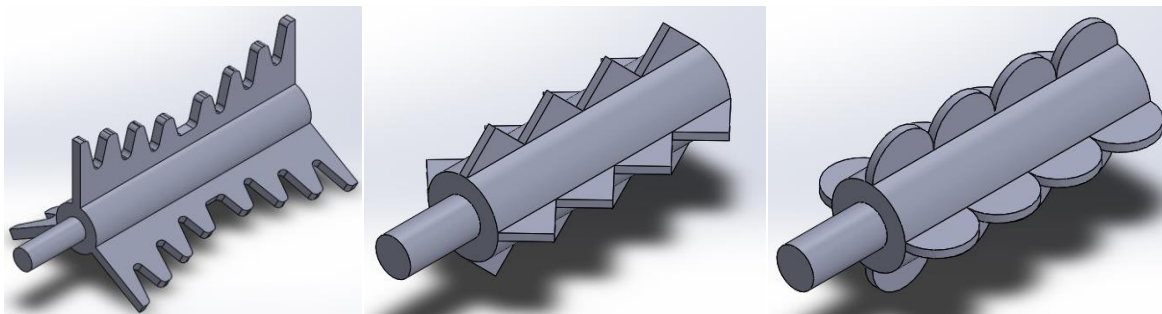


Ilustración 59. Alternativas de formas de dientes sugeridas [Autor]

De las cuales se evaluaron y escogieron dos alternativas, durante las pruebas de validación del prototipo.

- **Distancia entre dientes**

La distancia entre dientes, así como la forma de estos influye en el área de contacto entre los dientes de la herramienta y el fruto, así como la deformación a la que se someten los dientes. Por lo que la distancia entre dientes se delimitó a un rango entre la distancia el radio medio de un fruto de café y la mitad del radio medio de un fruto de café.

Para finalmente escoger una distancia entre dientes nula con el fin de obtener una mayor área de contacto.

- **Velocidad de funcionamiento de la herramienta**

La velocidad de funcionamiento de la herramienta es un parámetro que influye directamente en la fuerza ejercida por la herramienta, sin embargo la determinación de la velocidad de trabajo adecuada depende de los demás parámetros anteriormente definidos, por lo que esta variable se determinó de forma experimental durante el proceso de optimización planteado en la metodología aplicada.

6.3. SIMULACIÓN

Basados en los aspectos teóricos anteriormente planteados y en los datos previamente adquiridos para el diseño de la simulación se plantearon distintos modelos de simulación, sin embargo por las limitaciones del software usado algunos escenarios no fueron posibles.

Inicialmente se buscó realizar una simulación transitoria de impacto, que suponía un momento inicial de no contacto entre los cuerpos, seguido de una colisión y luego un desplazamiento conjunto de los cuerpos generando la deformación de ambos, para terminar en una separación de los cuerpos.

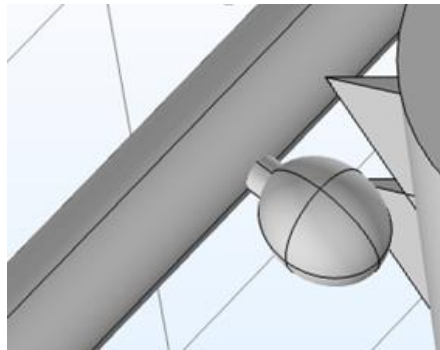


Ilustración 60. Geometría simulación de impacto [Autor]

Finalmente realizó una simulación estacionaria del instante de deformación y desplazamiento de los dos cuerpos en conjunto. Con el objetivo de analizar el esfuerzo sometido del pedúnculo según el módulo de elasticidad del material de los dientes.

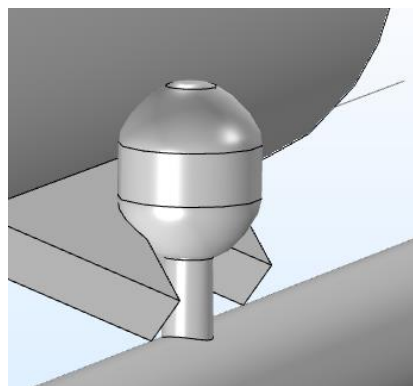


Ilustración 61. Geometría simulación de deformación y desplazamiento [Autor]

6.3.1. Consideraciones de la simulación

Para el desarrollo de esta simulación se realizó una geometría simplificada del mecanismo y se tuvieron algunas consideraciones especiales, tales como:

- Para simular la sujeción de la rama al tallo del árbol, se aplicó una restricción fija en un extremo de la rama, para simular esta como una viga en voladizo:

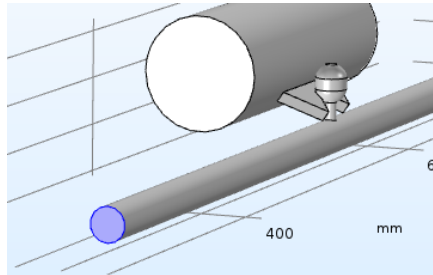


Ilustración 62. Rama simulada como viga en voladizo [Autor]

- Para simular el movimiento de los dientes durante la rotación de la herramienta, se aplicó una fuerza puntual en el extremo de los dientes en contacto con el fruto del cafeto. Esta fuerza se definió como una variable de simulación, ya que se quiso analizar la implicación de la variación de la fuerza en la deformación del pedúnculo.

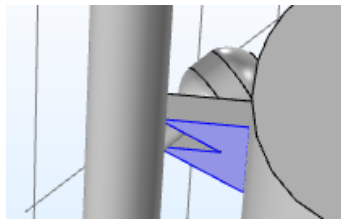


Ilustración 63. Fuerza que simula el desplazamiento de los dientes [Autor]

- Así mismo se realizaron modificaciones a la geometría, tales como reducción de aristas y vértices, esto con el objetivo de disminuir la cantidad de elementos de la malla y centrar el análisis en las zonas de estudio.

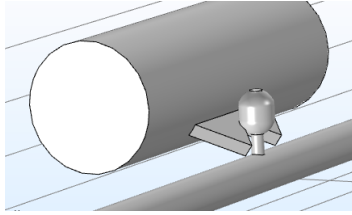


Ilustración 64. Geometría simplificada [Autor]

Por otra parte, también se realizaron modificaciones en la malla para mejorar el análisis en la zona de contacto de los dos cuerpos, por ello se diseñó una malla tetraédrica fina ya que se genera una malla de tamaño adecuado para el análisis de las superficies en contacto de los cuerpos. Pues para mallas con elementos de mayor tamaño el software no es capaz de simular.

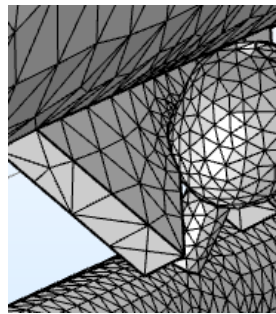


Ilustración 65. Malla personalizada para el punto de contacto [Autor]

- Se consideraron las propiedades físico-mecánicas de cada parte de la planta (pedúnculo, fruto y rama) obtenidas en las ilustraciones 33 – 36 para una mayor precisión en la simulación. En cuanto a las propiedades físico-mecánicas del elastómero se seleccionó un poliuretano termoplástico (TPU) por sus ventajas de alta resistencia a la abrasión y su alta dureza. Cabe destacar que estos elastómeros se pueden obtener con un rango amplio de propiedades mecánicas, por lo que se buscó determinar en qué rango se encontraba el módulo de elasticidad del TPU indicado para desprender los frutos maduros. Es por ello que se optó por analizar la deformación de los dientes y el pedúnculo ante distintos valores del módulo de Young del diente.

6.3.2. Resultados de la simulación

Se realizó un análisis de la tensión de Von Mises máxima para un valor nominal del módulo de Young en el diente del elastómero y para distintas fuerzas de desprendimiento aplicadas, de lo que se obtuvo:

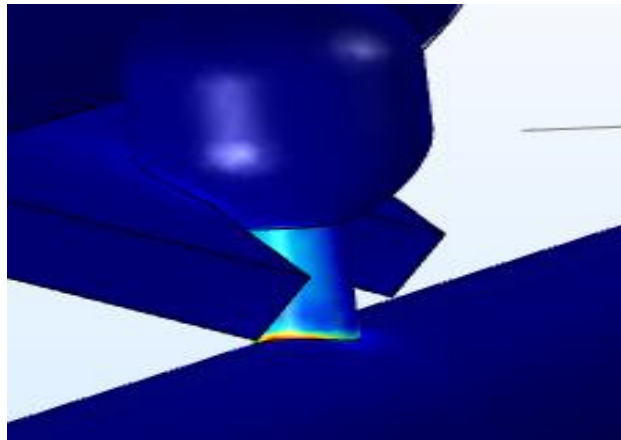


Ilustración 66. Punto de análisis de esfuerzo máximo [Autor]

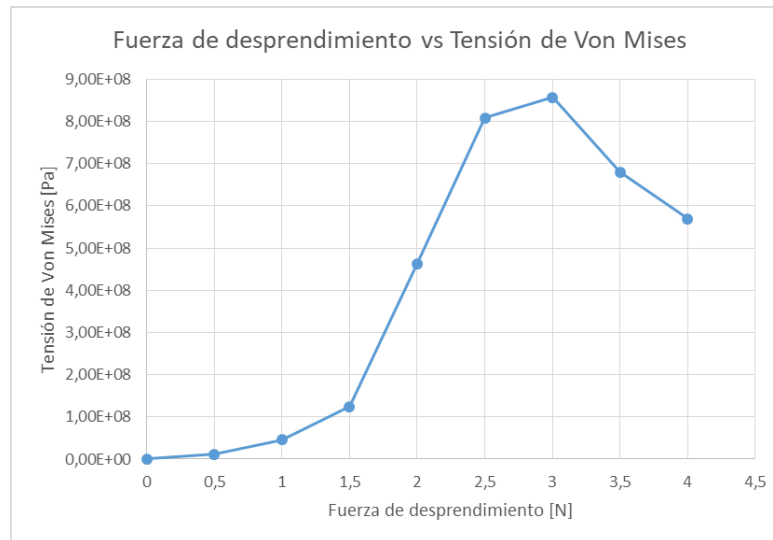


Ilustración 67. Gráfica de fuerza de desprendimiento vs tensión de Von Mises máxima [Autor]

Por otra parte, se realizó un análisis de la relación entre la variación de la fuerza de desprendimiento, la variación del módulo de Young del elastómero y el esfuerzo de Von Mises máximo en la estructura. Para esto se realizó una variación de la fuerza de desprendimiento entre 0 – 4 [N] y del módulo de Young entre 10 – 15 [MPa], de lo que se obtuvo:

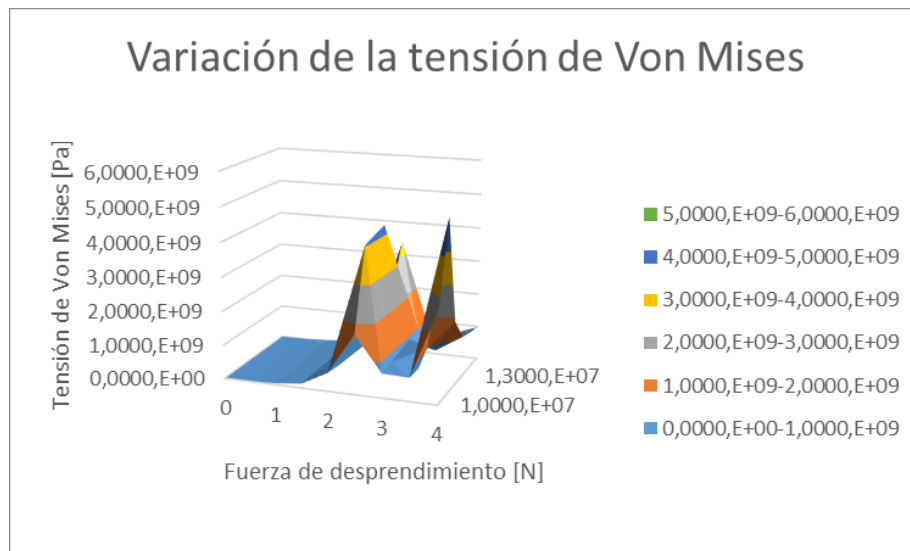


Ilustración 68. Superficie de variación de tensión de Von mises [Autor]

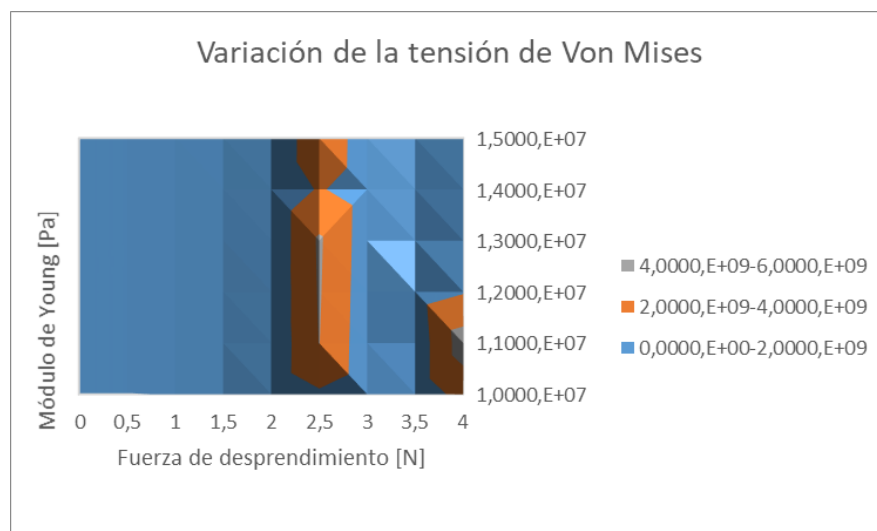


Ilustración 69. Curvas de nivel de la tensión de Von Mises [Autor]

6.3.3. Conclusiones de la simulación

- De las ilustraciones 68 – 69, se concluyó que el elastómero que generara una tensión adecuada para el desprendimiento de los frutos de café, es uno cuyo Módulo de Young está entre 10 - 12[MPa]. Pues para este intervalo se encontraron los mayores esfuerzos en el pedúnculo antes distintos valores de fuerza de desprendimiento.
- También se observó que según las condiciones de simulación la relación fuerza de desprendimiento vs tensión de Von Mises máxima no es lineal, esto se puede deber a las deformaciones producidas en el elastómero ante distintos niveles de fuerza. Por lo que a pesar de que en la literatura se encuentra que con una fuerza aproximada de 6 [N] se puede desprender un fruto de café, se estima que para el caso particular estudiado y dada la geometría planteada se podría desprender el fruto con fuerzas menores. Sin embargo, esto fue constatado experimental con el fin de mejorar el diseño y se expone con mayor detalle en la etapa de optimización. Sin embargo, luego ser constatado experimentalmente se notó que debido a que no se tuvieron en cuenta las fricciones entre los materiales las fuerzas necesarias son mayores dada el área de contacto.
- Se podrían obtener mejores resultados en una simulación de impacto, ya que se podría simular un escenario más cercano a la realidad. Así como se podrían analizar mayor cantidad de variables, tales como fuerza de impacto, desplazamiento total del pedúnculo, máxima deformación del elastómero entre otros. Por lo que, para obtener unos resultados más acertados en el área se recomienda usar el uso de Ansys para esta simulación.
- Teniendo en cuenta datos técnicos del Módulo de Young para diversas durezas, se concluyó que el intervalo de durezas indicado para la aplicación deseada oscila entre los 65 – 85 Shores. Sin embargo, se probaron durezas entre los 40 – 90 Shores con el fin de abarcar un mayor espectro. [26]

6.4. DISEÑO MECÁNICO Y ELÉCTRICO

Para el desarrollo del diseño mecánico y eléctrico de la herramienta se partió de la selección de las medidas geométricas del cafeto que se mostraron en las ilustraciones 33 y 34, para plantear un diseño preliminar expuesto a continuación. Así mismo de los resultados obtenidos de la simulación y de las observaciones hechas en las salidas de campo.

El diseño de la herramienta se estructura de la siguiente manera:

- Diseño del extremo de la herramienta (actuador final)
- Selección de motores del actuador final
- Diseño de brazo de soporte del actuador final
- Diseño del eslabón de soporte del extremo de la herramienta
- Selección del dinamo y baterías
- Diseño de acople del dinamo al eje de la guadañadora

6.4.1. Diseño del extremo de la herramienta (actuador final)

En el diseño del actuador final, se pretendió diseñar un mecanismo que permitiese el fácil montaje y desmontaje del elastómero, así mismo se buscó un material para la pieza de soporte del elastómero que tuviese una alta resistencia a la fatiga, a la corrosión por las condiciones ambientales a las que pudiese someterse. Finalmente, se escogió el acetal por su rigidez, resistencia a la corrosión, carácter comercial, maleabilidad, una mayor resistencia a la compresión y una menor densidad que el aluminio:

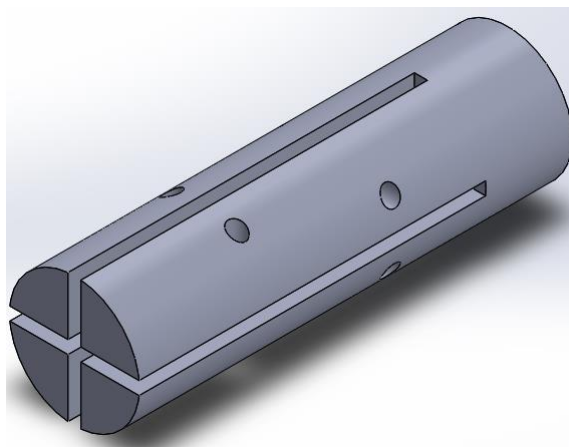


Ilustración 70. Pieza de soporte del elastómero [Autor]

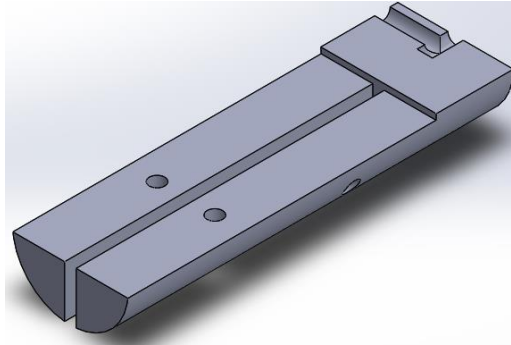


Ilustración 71. Vista de corte transversal de la pieza de soporte del elastómero [Autor]

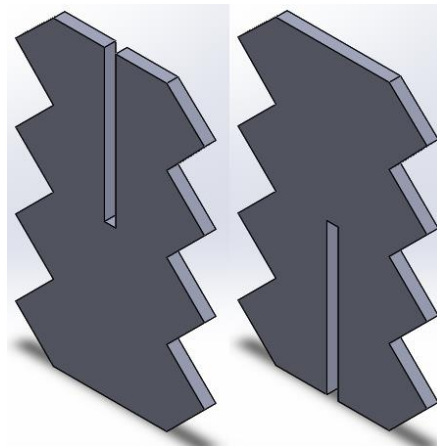


Ilustración 72. Pieza de elastómero [Autor]

Ya que esta herramienta será cargada por un operario y el actuador final se encuentra alejado del centro de estabilidad del cuerpo humano, se buscó que el peso del actuador final no superara los 2 kilogramos con el objeto de disminuir el momento ejercido por el actuador final. Teniendo en cuenta esto el peso de la pieza de soporte del elastómero posee un peso aproximado 64g, los tornillos prisioneros a usar de 4mm x 8mm de referencia DIN 913 tienen un peso aproximado 25g. Se planteó usar 8 tornillos para la sujeción del elastómero, 1 tornillo para la sujeción del motor, teniendo así un peso de 225g por causa de los tornillos, para un peso total aproximado en esta pieza de 290g.

6.4.2. Selección de motores del actuador final

Para la selección del motor del actuador final se tuvieron en cuenta los datos de fuerza de desprendimiento necesarias para la obtención del fruto de café, para ello

tomamos como referencia los datos de la ilustración 38 y se realizó el siguiente análisis de fuerzas:

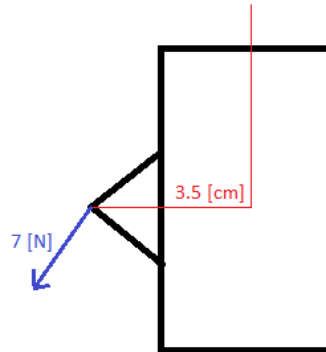


Ilustración 73. Análisis de cargas de la pieza de soporte del elastómero [Autor]

Teniendo en cuenta la fuerza necesaria para desprender el fruto de café y el máximo brazo de palanca, se obtuvo que el torque necesario para desprender el fruto de café es de:

$$7[N] \times 3.5 [cm] = 24.5 [N - cm]$$

$$2.45 [Kgf - cm]$$

Asumiendo el peso de la herramienta despreciable se seleccionó un motor capaz de suplir el torque necesario, de bajo peso, tamaño reducido y con un costo energéticos bajo. Así mismo, según lo seleccionado en la etapa de definición de componentes, un motor eléctrico de corriente continua. De modo que la referencia comercial de motor seleccionada fue:

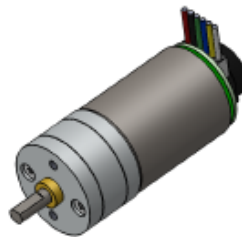
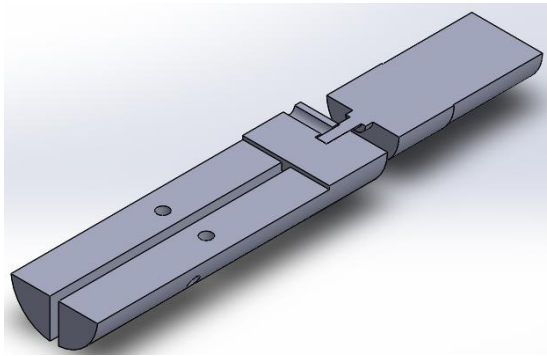


Ilustración 74. Motorreductor 20.4:1 25Dx50L/5.5 kg-cm/460 RPM (Marca Pololu) [26]

El motor seleccionado es distribuido a nivel nacional por la compañía tdrobótica, sus principales características son: [27]

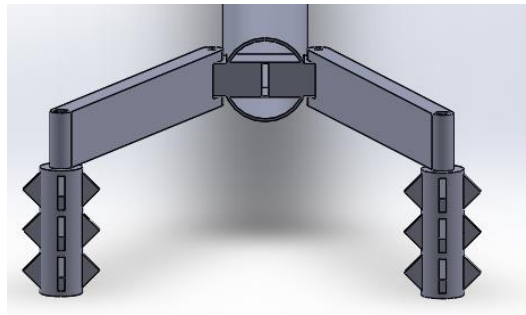
- Tamaño: 50 mm de longitud x 25 mm de diámetro (50L x 25D)
- Peso: 85 Gramos
- Diámetro del eje: 4 mm
- Relación de engranajes: 20.4:1
- Velocidad libre del motor a 6 V: 460 RPM
- Consumo de corriente sin carga a 6 V: 550 mA
- Consumo máximo de corriente a 6 V : 6500 mA
- Torque máximo a 6V: 5.5 kg-cm



***Ilustración 75.** Vista transversal del acople del motor a la pieza de soporte del elastómero [Autor]*

6.4.3. Diseño de brazo de soporte del actuador final

Para el diseño de esta pieza se tuvo en cuenta que la densidad de frutos en la rama es constante, por lo que sí se fijase una separación constante entre los eslabones de herramienta no sería posible adaptarse a distintas densidades de frutos. Este análisis se basó en un prototipo previo en el que se planteó un sistema de dos brazos:



***Ilustración 76.** Prototipo planteado previamente [Autor]*

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones del diseño se planteó un sistema que permite una separación variable y regulada entre los eslabones, así mismo permite al operario controlar ese parámetro. Para ello se diseñaron dos alternativas:

- **Alternativa 1**

La primera alternativa sugiere un sistema de engranes que al posicionar un motor en el eje de uno de los brazos genere el movimiento resultando del segundo brazo, como se muestra a continuación:

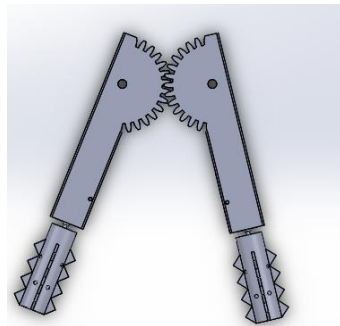


Ilustración 77. Alternativa 1 [Autor]

Ese diseño sugiere el uso de un motor adicional, así como un peso aproximado de 1.6Kg. De igual forma, implica un aumento de complejidad en el diseño por lo que se considera poco adecuado para las condiciones de funciones. Pues además de buscarse un diseño estético y útil, se busca que sea lo más sencillo posible.

- **Alternativa 2**

En esta alternativa se disminuye la complejidad del diseño y se da mejor uso a las propiedades de cada material, pues se usan piezas de acero inoxidable combinadas con accesorios de bronce por sus propiedades auto lubricantes.

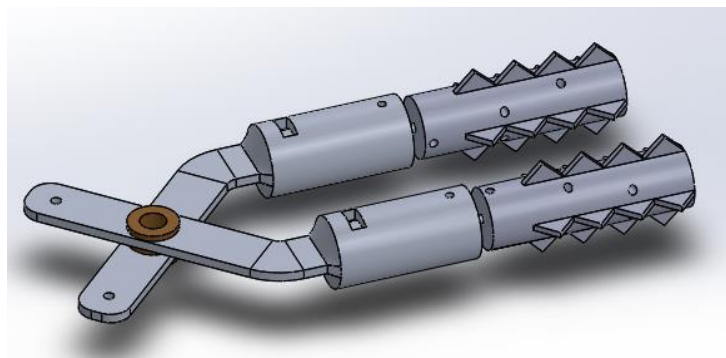


Ilustración 78. Alternativa 2 [Autor]

En esta alternativa se tuvieron en cuenta la fricción entre materiales, la exposición a la corrosión, el peso y el aislamiento del sistema eléctrico.

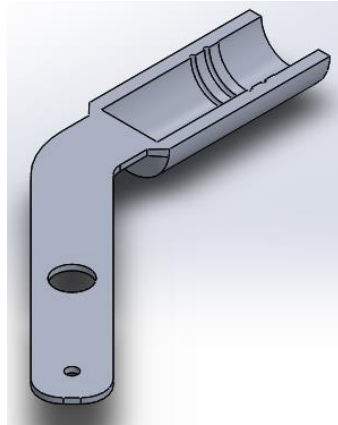


Ilustración 79. Brazo de soporte del actuador final [Autor]

En este diseño se usan juntas tóricas para evitar la filtración de fluidos a la cámara interior del encoder. Así mismo tornillos prisioneros para aumentar la sujeción radial del motor y evitar que el motor se deslice.

La unión o punto de pivote del mecanismo de tijera posee buje de bronce y una arandela de bronce intermedia para disminuir la fricción entre aceros de manera simple y sencilla.

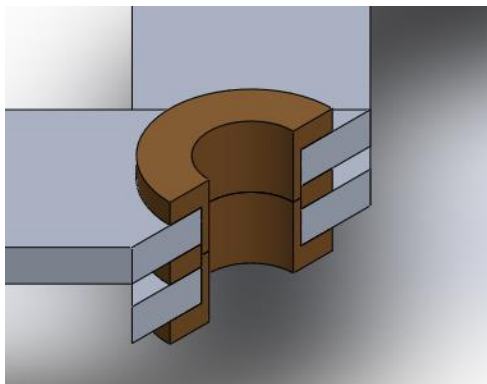


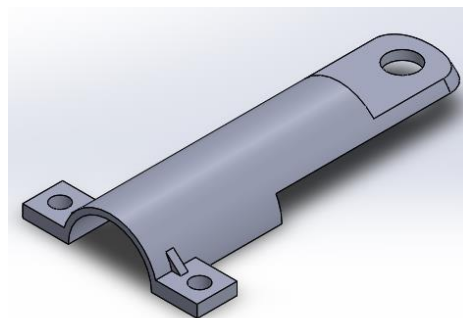
Ilustración 80. Accesorios de bronce para disminuir la fricción [Autor]

Esta alternativa posee un peso aproximado de 1.4Kg, inferior al peso de la alternativa 1. Se planeó usar un resorte tensión para que mantuviese el mecanismo normalmente abierto y se le incorporará una guaya unida a un manubrio de mando operado por el usuario que le permitiera a ese disminuir la separación entre los

extremos según los requiera. Cabe resaltar que la constante del resorte puede ser ajustada para graduar la fuerza que necesita el operario para cerrar los extremos.

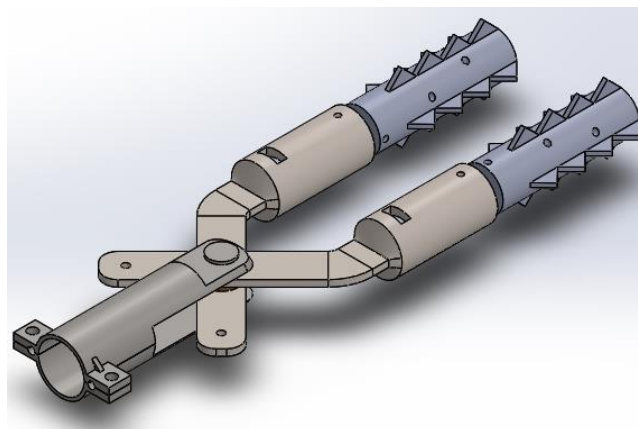
6.4.4. Diseño del eslabón de soporte del extremo de la herramienta

Para el diseño de este eslabón se buscó un material resistente a la corrosión y que tuviese una alta resistencia mecánica ya que esta pieza posee una relación de esbeltez alta que podría causar que el eslabón se flexionara. También se buscó que fuese ligera, por lo que se decidió usar un perfil tubular que posee una gran integridad estructural al distribuir de manera más eficiente las cargas en el cuerpo.



***Ilustración 81.** Eslabón de soporte de los brazos [Autor]*

Esta pieza fue impresa en PET G para analizar el funcionamiento de la herramienta. Por otra parte, para el prototipo final se realizó la pieza en Acetal, con un peso de aproximadamente 180g.



***Ilustración 82.** Ensamblaje final del extremo de la herramienta [Autor]*

Ahora bien, hablando del diseño del resto del eslabón, se sugirió un diseño de activación de la tijera mediante el movimiento de los mandos de un manubrio, que contraiga y extienda la guaya a medida que estos se mueven:

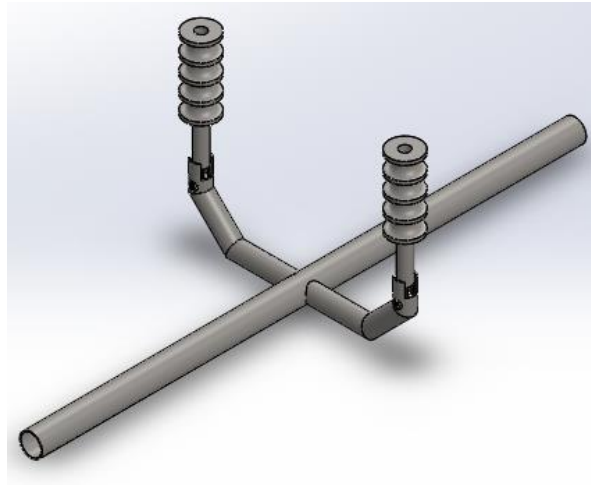


Ilustración 83. Manubrio y mando de apertura de los brazos de la herramienta [Autor]

Para esta pieza se sugirió fabricarla en acero inoxidable para evitar la corrosión del material, así mismo el mango del manubrio se planteó en espuma antideslizante para mayor confort del operario. El peso aproximado de esta pieza es de 1.5Kg con una extensión de 60cm. Esto nos da un peso máximo de 3.4Kg del peso total del mecanismo.

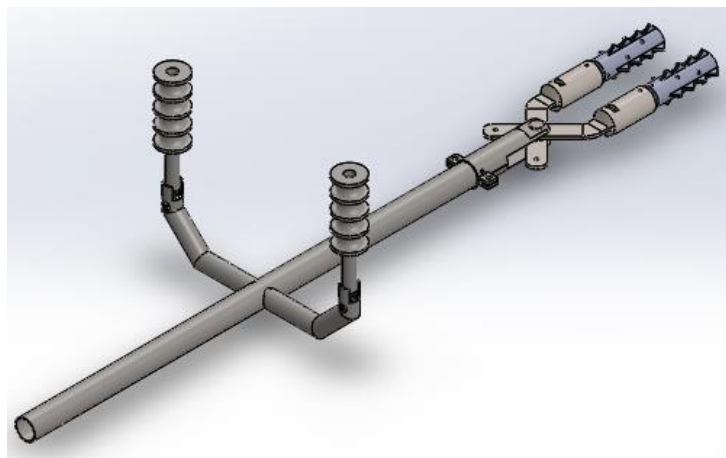


Ilustración 84. Ensamblaje total del mecanismo [Autor]

6.4.5. Selección del dinamo y baterías

Ya que se buscó disminuir la complejidad del diseño y aprovechar los recursos disponibles en las plantaciones de cultivos cafeteros, se usó como fuente de energía un motor de combustión sin embargo los elementos del sistema funcionan con corrientes continua, por lo que se hizo necesario el diseño de un sistema de conversión de energía mecánica a eléctrica.

Teniendo esto en cuenta primero y viendo que el consumo energético del mecanismo está localizado principalmente en los motores del extremo de la herramienta, tenemos que el consumo energético es:

- Los motores funcionan a 6V 0.5A sin carga, sin embargo su corriente a máxima carga (5,5Kg-cm) es de 6,5A. Pero dado que la máxima carga sometida es de 2,4Kg-cm. Suponemos un consumo promedio por motor de 3A y máximo de 6A. Obteniendo así que para una autonomía de una hora por carga de la batería sería necesaria una batería recargable de 6Ah a 10Ah a 6V. Se estableció una autonomía de carga de 1 hora, ya que las baterías necesarias para una mayor autonomía tienen un peso superior a los 2.5Kg y se busca reducir sustancialmente la carga del operario.



Ilustración 85. Batería Netion 6v 10Ah [62]

Las características principales de la batería seleccionada comercializada localmente por la compañía Electrónicas DC, son:

- Voltaje nominal: 6v
- Amperes hora: 10Ah
- Largo: 151mm
- Ancho: 50mm
- Alto: 94mm
- Peso: 1.65Kg

Por otra parte, el dinamo que carga las baterías se buscó que posea una velocidad nominal similar a la velocidad de giro del eje de la guadañadora, que es aproximadamente 7000 [rpm], así mismo que la potencia del motor (dinamo) sea mayor a la potencia consumida por el sistema de manera que se seleccionó el siguiente motor:



Ilustración 86. Dinamo seleccionado [64]

Las características principales del dinamo son:

- Voltaje nominal: 24V
- Velocidad nominal: 5680 rpm
- Velocidad máxima: 9500 rpm
- Corriente nominal: 10.8A
- Peso: 1.1Kg
- Eficiencia del motor: 94%
- Inercia del rotor: 536 g/cm²

6.4.6. Diseño de acople del dinamo al eje de la guadañadora

Para el diseño del acople del dinamo al eje de la guadañadora se supuso un modelo estándar de guadañadora con el fin de adaptar el acople a las medidas de este modelo. Así mismo, se tomó como base el dinamo previamente escogido. Este acople posee tres piezas individuales: el buje de acople entre el eje de la guadañadora y el eje del dinamo, el soporte del dinamo y el soporte de la guadaña con el eje principal de la herramienta.

Los materiales sugeridos para esta pieza fueron acero inoxidable o aluminio, con un peso aproximado de 6.8 kg y 2.4kg respectivamente, sumado al peso del dinamo de 1.1 kg sería un peso total de 7.9 kg y 3.5 kg respectivamente. Esto nos da un peso máximo de 11.4Kg del peso total del mecanismo sin tener en cuenta el peso de la guadañadora.

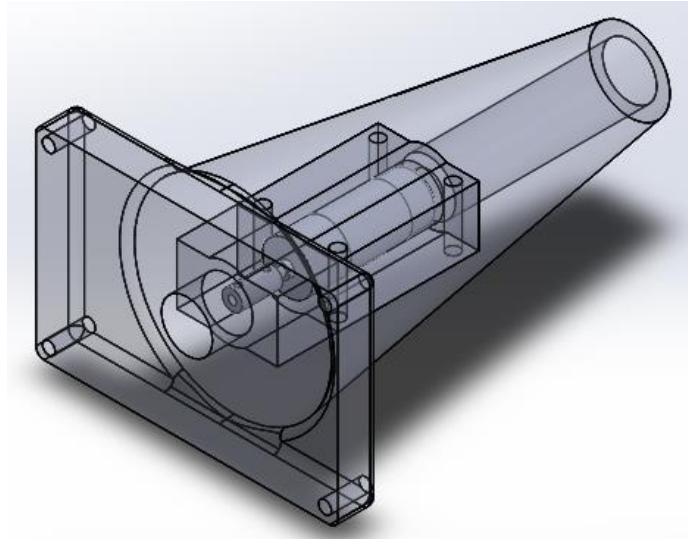


Ilustración 87. Acople del dinamo al eje de la guadañadora [Autor]

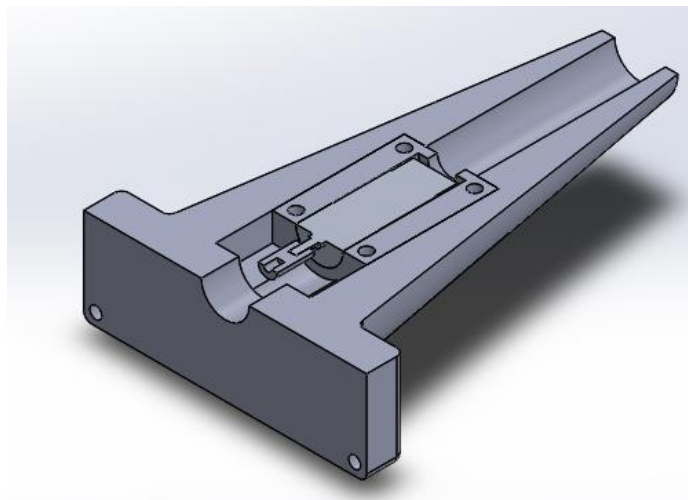


Ilustración 88. Mecanismo de apertura de los brazos (inicial) [Autor]

Luego de analizar el peso total de la herramienta y observar los beneficios de tener un funcionamiento continuo, se decidió dejar el acople a la guadañadora como un diseño propuesto y no implementarlo en el prototipo. Esto con el motivo de disminuir el peso de la herramienta considerablemente, de modo que la herramienta funciona con una batería recargable de 6v.

6.5. OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO

Luego de revisar la funcionalidad y controlabilidad del diseño propuesto, se observó que algunas de las variables controladas, tales como: distancia de separación entre los brazos, peso de la herramienta, resistencia mecánica y velocidad de giro de los motores del extremo de la herramienta; no estaban siendo aprovechadas de la mejor manera. Por lo que se optimizó el diseño de la herramienta para obtener un mayor control de estas variables por parte del operario, con una mayor comodidad.

Con el fin de optimizar el diseño enfocado en las variables mencionadas se realizaron los siguientes cambios:

- Optimización del mecanismo de apertura de los brazos
- Optimización del sistema de sujeción de los dientes de la herramienta
- Optimización del manubrio
- Optimización del sistema de control de las variables del sistema
- Optimización de los dientes de la herramienta
- Optimización del sistema de alimentación de energía

Adicionalmente, luego de la construcción y prueba del prototipo planteo en materiales de prototipado rápido, se realizó una optimización propuesta durante el diseño de metodología. Dado que uno de los aspectos más relevantes del proyecto es el desprendimiento de los frutos de café, se realizó una optimización experimental del material y la geometría de los dientes del extremo de la herramienta.

6.5.1. Optimización del mecanismo de apertura de los brazos

Al optimizar el mecanismo de apertura de los brazos se tuvo como objetivo mejorar la controlabilidad que tiene el operario sobre la distancia de separación entre los brazos y ángulo de apertura de los brazos, para esto se cambió el mecanismo de apertura y la estructura de los brazos.

Inicialmente, se propuso controlar la apertura de los brazos mediante una guaya unida a un manubrio, que al variar la posición de los extremos del manubrio variaría distancia de separación entre los brazos. Este diseño requería movimientos alternantes y repetitivos por parte del operador alrededor del eje de soporte, como se muestra en la ilustración 90, que inestabilizarían al operador, generarían poco agarre al manubrio y causarían desgaste físico adicional.

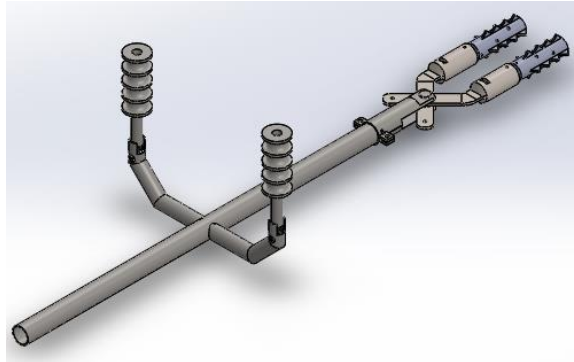


Ilustración 89. Mecanismo de apertura de los brazos (inicial) [Autor]

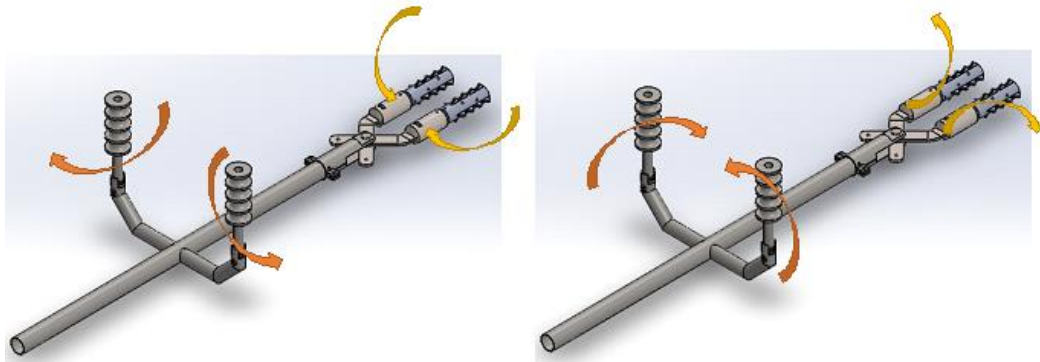


Ilustración 90. Movimientos alternantes alrededor del eje de soporte [Autor]

El diseño optimizado propuesto poseía un control de apertura electrónico mediante un sistema de doble tijera que es accionado por un actuador lineal (siguiente ilustración), el cual aumenta o disminuye la distancia entre los brazos a medida que el eje del actuador lineal se mueve hacia adelante o hacia atrás, como se muestra a continuación.

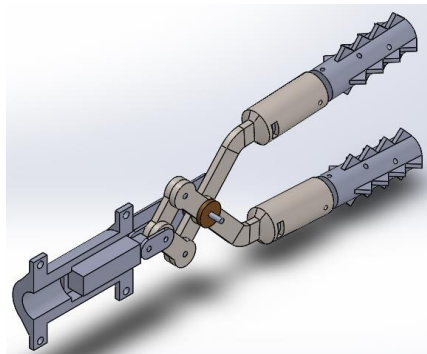


Ilustración 91. Mecanismo de apertura de los brazos (final) [Autor]

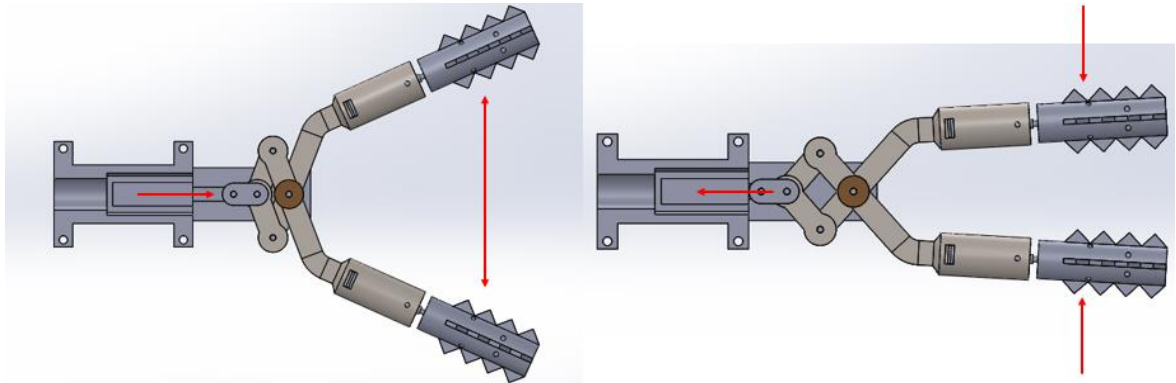


Ilustración 92. Movimientos de la tijera con respecto al desplazamiento del actuador lineal [Autor]

Para esto fue necesaria la selección de un actuador lineal capaz de desplazar el mecanismo de tijera hasta la posición deseada, para ello se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: el peso del mecanismo a desplazar, la longitud a recorrer por el vástago del actuador y el espacio disponible para ubicar el actuador.

Conociendo que el peso del sistema de tijera completo de la herramienta es de 2kg y sabiendo que por ecuaciones de estática del mecanismo la fuerza necesaria para desplazar el mecanismo debe ser mayor al peso del mecanismo, establecemos que el mecanismo ejerce una fuerza de 25 [N], mayor a la requerida para retener la carga [28]. Con un factor de seguridad de 2.5, se obtiene que la fuerza necesaria para desplazar el mecanismo es de 75 [N], ya que esta medida no es comercial se estableció una fuerza de 100[N]. El máximo recorrido posible del vástago del cilindro es de 4 [cm], este recorrido no es comercial por lo que se estableció un recorrido de 5 [cm]. Teniendo en cuenta todos los aspectos anteriores se selección el siguiente actuador lineal:



Ilustración 93. Actuador lineal seleccionado [66]

Las características principales del actuador lineal son:

Voltaje de operación: 6VDC.

Corriente de operación: 1.3A a 6VDC

Máxima fuerza (levantado): 100N (22.5Lbf)

Recorrido: 50mm

Relación engranajes: 63:1

Máxima velocidad (sin carga): 20mm/s

Temperatura de Funcionamiento: - 10°C ~ 50°C

Índice IP: IP54

Este diseño fue finalmente reemplazado por un sistema de apertura mecánico, ya que la inercia del actuador lineal no era suficiente para retener la carga con el actuador apagado, forzando al sistema a mantener una señal constante al actuador lineal para poder mantener la posición deseada. Esto genera un aumento sustancial de corriente, que se ve reflejado en una disminución de la autonomía de la herramienta.

El diseño mecánico final implementado consiste en desplazar manualmente el mecanismo de tijera hasta la posición deseada mediante un tornillo ubicado dentro de una ranura de guía, que al ajustar el tornillo mantiene la posición del mecanismo sin generar ningún consumo de corriente.

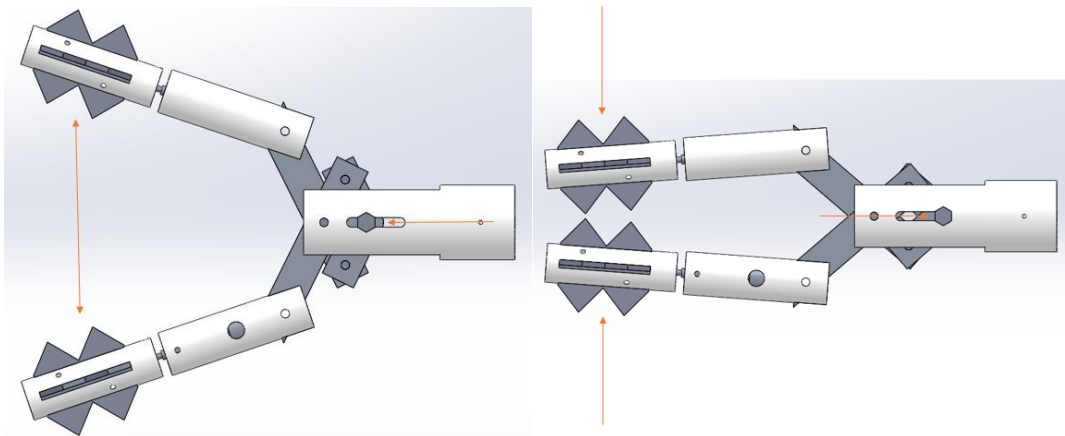


Ilustración 94. Movimientos alternantes con respecto al movimiento mecánico [Autor]

6.5.2. Optimización del sistema de sujeción de los dientes de la herramienta

Al optimizar el sistema de sujeción de los dientes se tuvo como objetivo corregir los desgarres presentados en las pruebas preliminares. Así mismo, se buscó mantener la integridad estructural de la pieza porta elastómeros, ya que durante la fabricación

de la versión preliminar se notó que el material no conservaba la geometría esperada debido a que el material usado no poseía la resistencia a la compresión necesaria. Sin embargo, cambiar el material constituía un aumento de peso en la herramienta, es por ello que se optó por una modificación en la geometría y no en el material. A continuación, se muestra el diseño final implementado y se exponen las mejoras obtenidas durante la implementación:

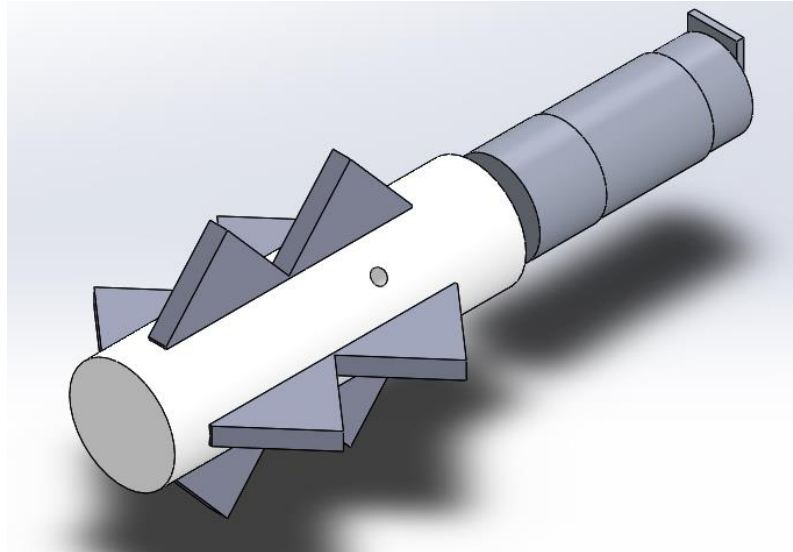


Ilustración 95. Sistema de sujeción de los dientes de la herramienta implementado [Autor]

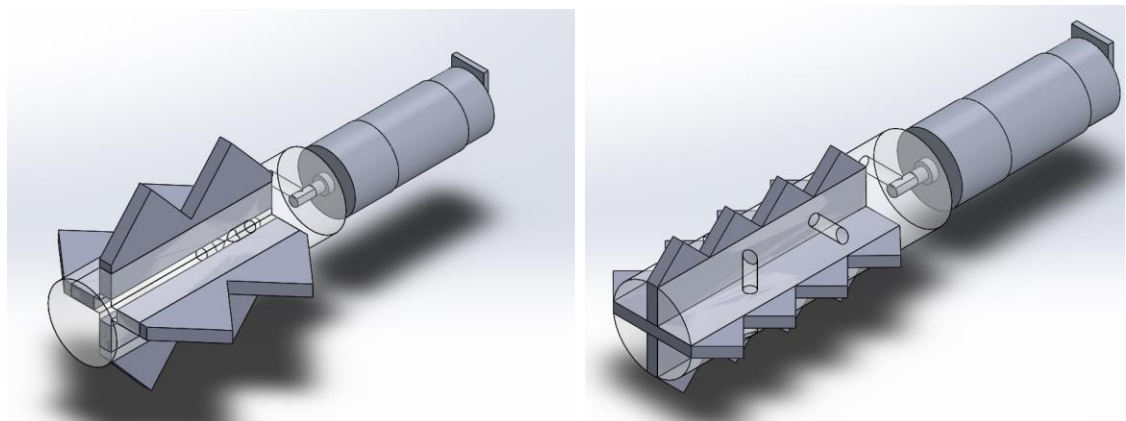


Ilustración 96. Comparación de los sistemas de sujeción. Final (Izquierda), Anterior (Derecha) [Autor]

Como se observa en la ilustración 96, el diseño preliminar sugirió que los dientes fuesen fijados al portaelastómero mediante tornillos prisioneros que presionaban las

paredes laterales de los dientes. Sin embargo, este diseño generaba que en los puntos de contacto entre los tornillos y los elastómeros se genera un desgarre del material luego de haber sido usado por un periodo inferior a 2 horas. Es por ello que se planteó aumentar el área de sujeción de los dientes, con el fin de disminuir los concentradores de esfuerzos en el material.

Como propuesta final se planteó que no se usarán dos conjuntos de dientes, sino cuatro conjuntos de dientes modulares independientes. Para aumentar el área de sujeción de los cuatro conjuntos se ubicaron dos tornillos a través de la arista generada en la geometría interna de la herramienta, los cuales al ser ajustados generarán una deformación por compresión en las paredes del portaelastómero que soportaban los dientes. De esta manera, se logró aumentar exponencialmente el área de sujeción, se redujo considerablemente la posibilidad de desgarre del material, se redujeron los concentradores de esfuerzos al usar fuerzas de sujeción distribuidas y no puntuales.

6.5.3. Optimización del manubrio

Al optimizar el manubrio se tuvo como objetivo reducir los esfuerzos en la estructura y mejorar la ergonomía del diseño, para esto se cambió el diseño del manubrio basado en dos aspectos importantes: un análisis estructural por simulación de dos modelos de diseño sugerido y teoría de diseño de máquinas sobre propiedades de los materiales.

Inicialmente, se propuso que el manubrio fuese una sola parte, formada de un eje central y dos brazos unidos a este mediante soldadura (ilustración 93). Sin embargo, este diseño se descartó por la falta de modularidad y los concentradores de esfuerzo en los puntos de soldadura. Por ello se propusieron dos diseños modulares más completos y con menores concentradores de esfuerzos, los cuales fueron evaluados mediante un análisis estructural por simulación.

- **Diseños sugeridos**

Ambos diseños, en comparación con el diseño inicial poseen una junta modular que une el eje de soporte principal y el manubrio de sujeción de la herramienta. En este nuevo diseño, se contempló la ruta del cableado del sistema electrónico del prototipo y el posicionamiento de sistema de control de la herramienta.

La diferencia fundamental entre ambos diseños es la posición del eje de soporte principal con respecto al manubrio de sujeción de la herramienta. En un diseño este eje de soporte se ubica por encima del manubrio de sujeción de la herramienta y en el otro por debajo, como se ilustra a continuación:

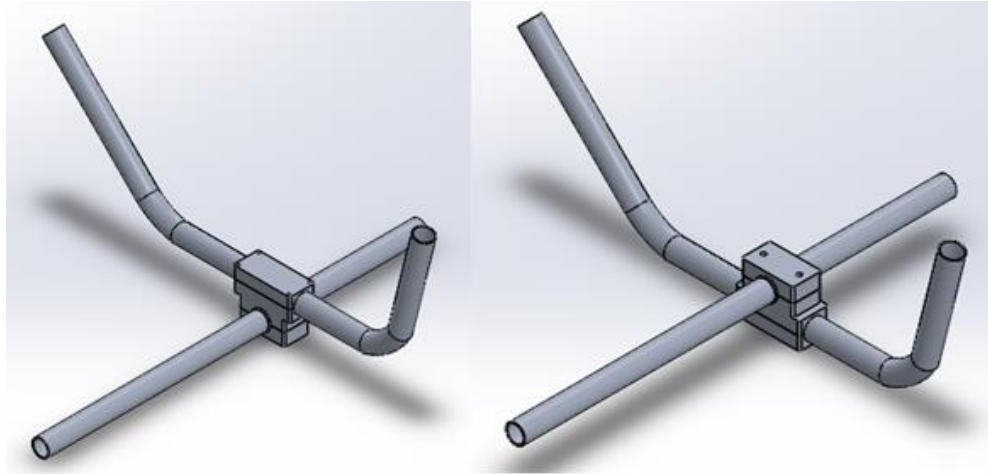


Ilustración 97. Diseños de manubrio sugeridos [Autor]

- **Simulación de esfuerzos y deformaciones en los diseños sugeridos**

Para elegir objetivamente el diseño adecuado para el prototipo a construir se realizó un análisis estructural por simulación usando el software Comsol, en este análisis se compararon los esfuerzos a los que se somete el eje de soporte principal de la herramienta en ambos diseños. Para esta simulación se hicieron varias suposiciones para asemejar las condiciones de simulación a las condiciones de funcionamiento real de la herramienta:

- Se aplicaron cargas puntuales en los extremos del eje de soporte, correspondientes al peso de la batería de alimentación del prototipo y al peso del extremo que soporta de los actuadores que interactúan directamente con el fruto de café.
- Se aplicaron restricciones de movimiento en los brazos del manubrio de sujeción de la herramienta para simular la fuerza de agarre del operador.

De la simulación de los diseños, ante condiciones iguales se obtuvieron los siguientes resultados:

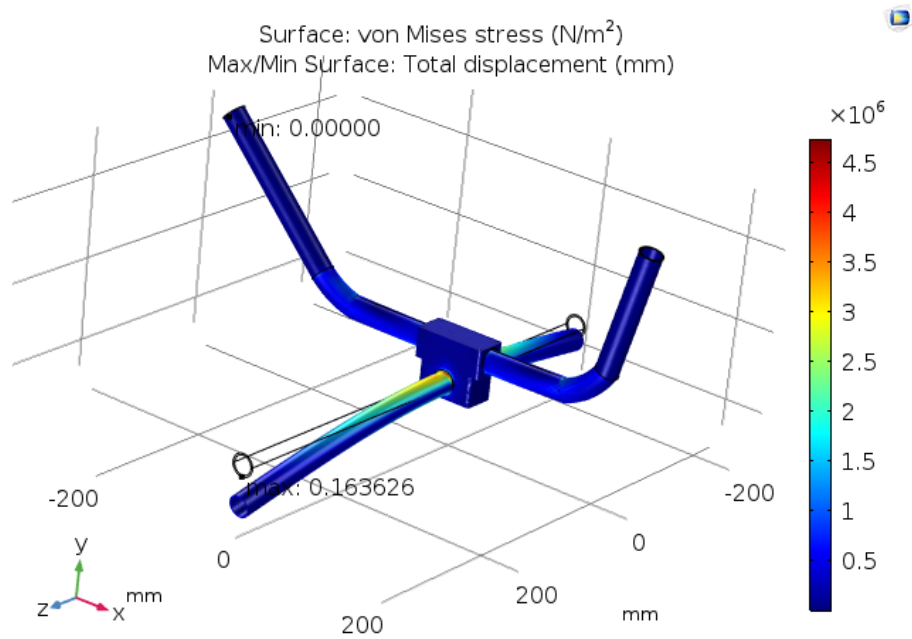


Ilustración 98. Simulación esfuerzos y deformaciones (Diseño 1) [Autor]

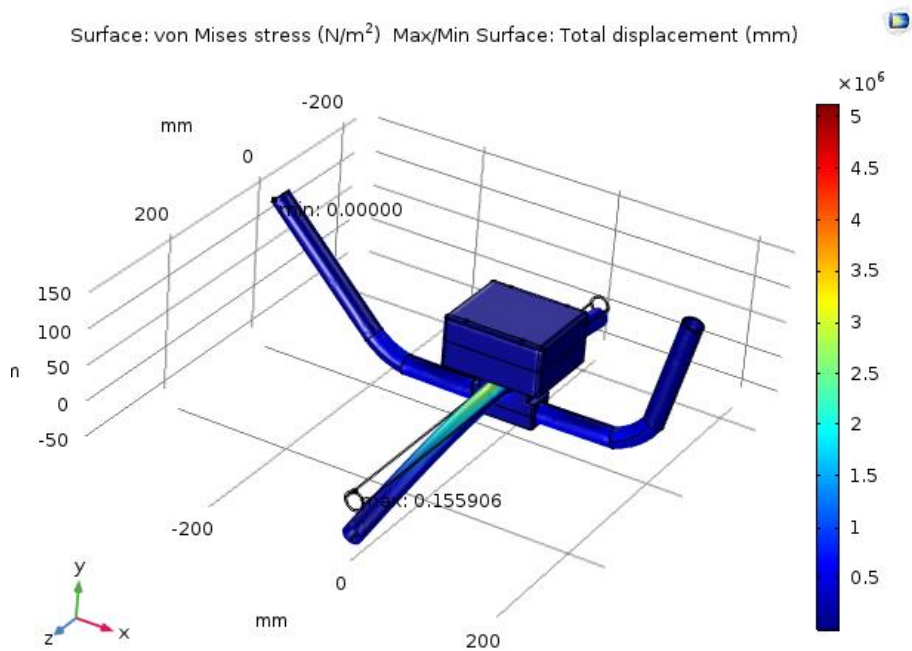


Ilustración 99. Simulación esfuerzos y deformaciones (Diseño 2) [Autor]

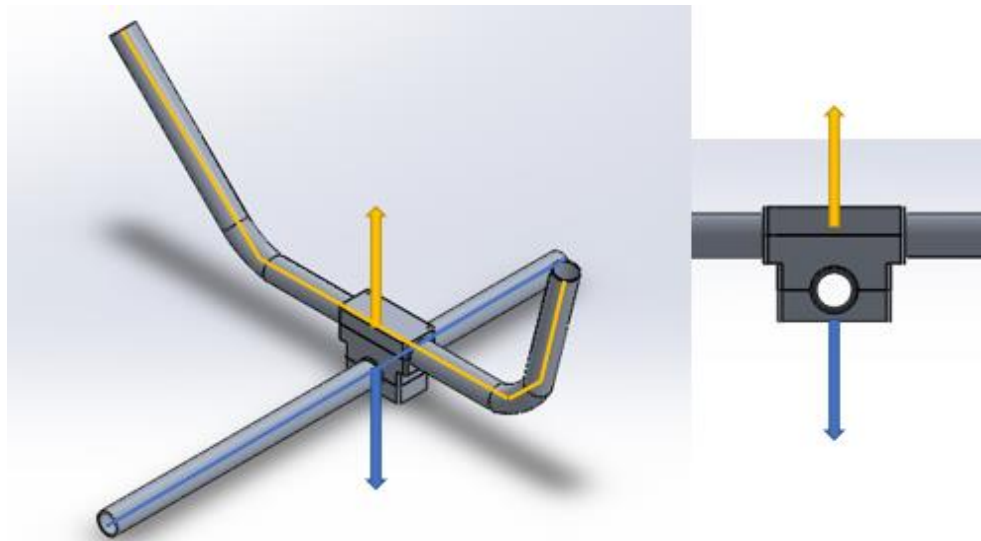
- **Conclusiones de la simulación y del diseño**

Observando los resultados obtenidos durante la simulación, se puede concluir que:

- Según los esfuerzos de von Mises resultantes, los mayores esfuerzos se encuentran en la intersección de los ejes como se esperaba. Comparando los esfuerzos en el eje de soporte principal, en el diseño 1 se observan mayores esfuerzos que en el diseño 2.
- El desplazamiento máximo resultante en la simulación, el cual es proporcional a la máxima deformación, es mayor en el diseño 1 que en el diseño 2.

Observando los diseños sugeridos y teniendo en cuenta el diseño de máquinas, se puede concluir que la junta de unión de los ejes del manubrio se somete a esfuerzos distintos en cada diseño:

En el diseño 1, se observa que debido a las fuerzas aplicadas en la junta de unión de los ejes, esta se encuentra sometida a esfuerzos de tensión.



*Ilustración 100. Fuerzas sometidas
(Diseño 1) [Autor]*

En el diseño 2, se observa que debido a las fuerzas aplicadas en la junta de unión de los ejes, esta se encuentra sometida a esfuerzos de compresión.

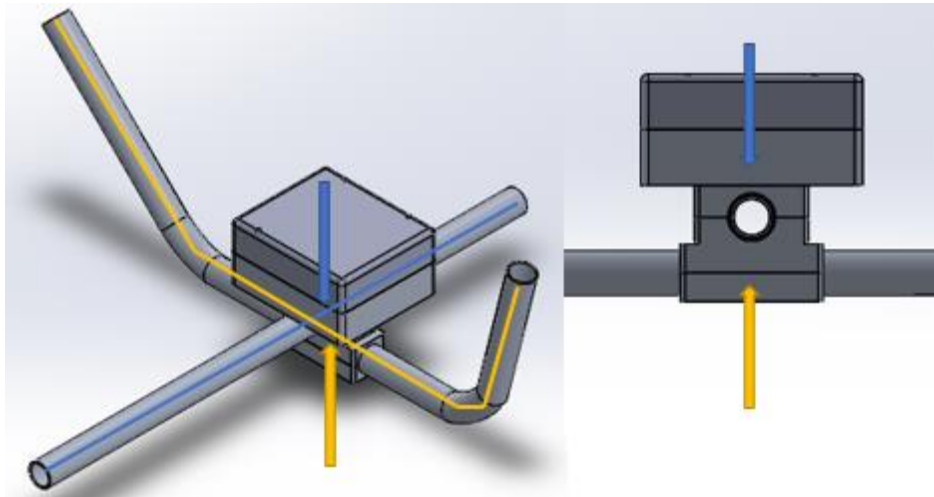


Ilustración 101. Fuerzas sometidas
(Diseño 2) [Autor]

Teniendo en cuenta las observaciones expuestas anteriormente, se puede concluir que el diseño que genera menores esfuerzos y deformaciones en la herramienta es el diseño 2. De igual manera, el diseño 2 al estar sometido a esfuerzos de compresión posee mayor resistencia a la ruptura, dado que los materiales usados soportan mayores esfuerzos de compresión que de tensión. Por esta razón, se escogió como diseño final el diseño 2.

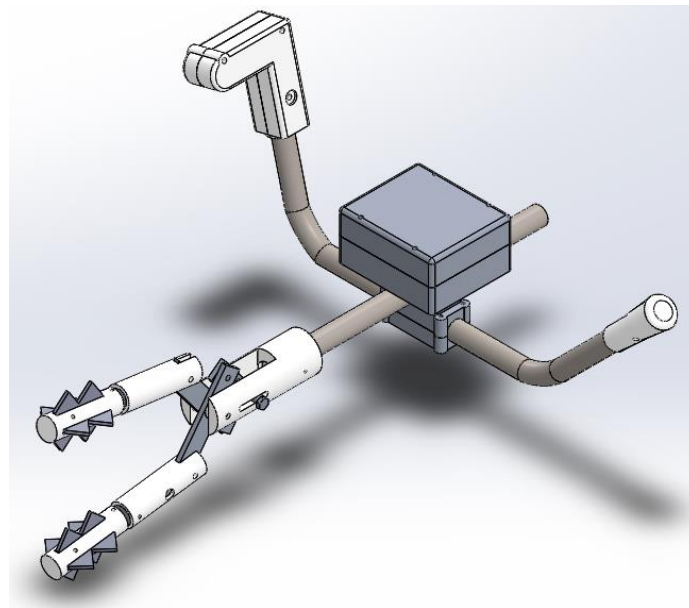


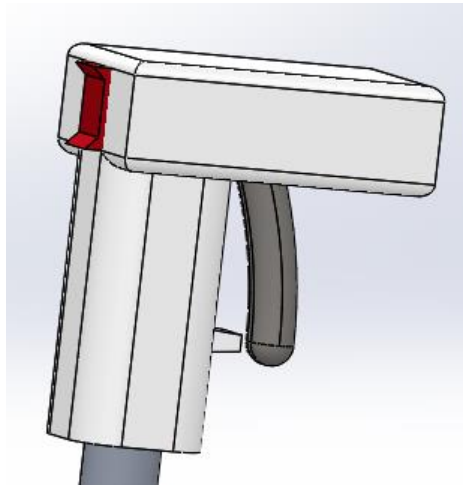
Ilustración 102. Diseño de manubrio
optimizado [Autor]

Este diseño de manubrio final fue implementado en dos materiales, el primero PET G (Impresión 3D) tenía un bajo rendimiento y un bajo coeficiente de fricción con el tubo de soporte del manubrio, generando una rotación del manubrio con respecto a la herramienta cuando se sometía a una carga. Es por esto que se decidió fabricar la estructura tubular del manubrio en acero inoxidable y la estructura modular que une el manubrio en aluminio, con el fin de generar mejores ajustes mecánicos y una mayor confiabilidad en la operación.

6.5.4. Optimización del sistema de control de las variables del sistema

Al optimizar el sistema de control de las variables del sistema se tuvo como objetivo brindar al operario una interacción directa con las variables del proceso, mediante la integración de un control de mando en el que el operario puede alterar dichas variables. La controlabilidad que tenía el operario en el diseño inicial se limitaba a una sola variable y requería esfuerzo físico.

Inicialmente, el operario sólo podía controlar la distancia de separación entre los brazos mediante el movimiento de los extremos del manubrio. Por ello se planteó un nuevo diseño que permite al operario controlar de manera más sencilla tanto la distancia de separación entre los brazos como la velocidad de giro de los motores del extremo de la herramienta, el cual se ilustra a continuación.



***Ilustración 103.** Diseño del sistema de control de las variables del sistema [Autor]*

El control de la distancia de separación entre los brazos se realiza mediante un pulsador de tres estados que actúa como señal de control para el actuador lineal

que se encarga de ampliar o reducir la distancia de separación entre los brazos. Los estados del pulsador corresponden con los tres movimientos del actuador lineal: avance, retroceso y parada del actuador.

El control de la velocidad de giro de los motores del extremo de la herramienta se realiza mediante un sistema similar al freno de una bicicleta, donde al desplazar el freno o gatillo este varía su posición angular con respecto a un punto de pivote, esta variación de posición angular es sensada por un potenciómetro lineal y a su vez usada como señal de control al algoritmo de control de velocidad de los motores. El punto de pivote del freno o gatillo, es también el eje saliente del potenciómetro, de forma que al accionar el freno el potenciómetro varía su resistencia proporcionalmente y por la acción de un resorte de tensión el sistema retorna a su posición inicial. El diseño mecánico del mando de control se ilustra a continuación:

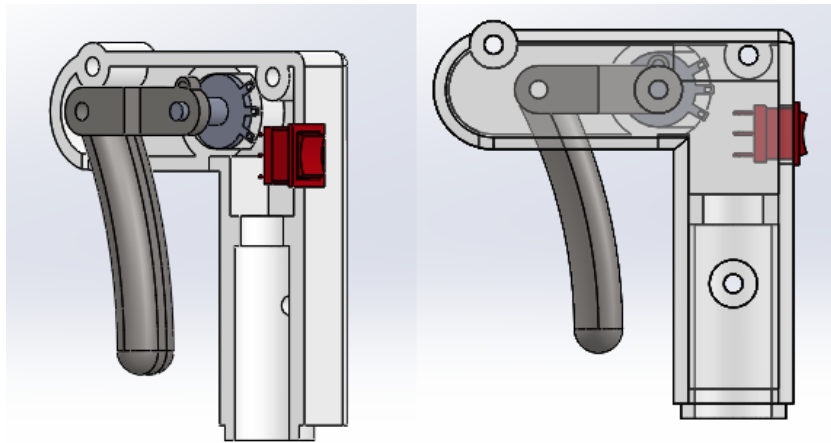


Ilustración 104. Mando de control del sistema [Autor]

6.5.5. Optimización de los dientes de la herramienta

El objetivo de optimización de los dientes de la herramienta, fue buscar la configuración de dureza y geometría en los dientes de la herramienta, capaz de desprender el mayor número de granos de café maduros. Para la optimización de los dientes de la herramienta se realizaron pruebas con parámetros variantes, tales como la dureza del material y geometría de los dientes. Como criterio inicial para la selección de la dureza del material, se usó la simulación realizada en el capítulo 6.3 del presente libro, en la que se definieron algunos intervalos de dureza óptimos para el objetivo a cumplir. Así mismo, el material se seleccionó previamente, en la sección 6.2.1 del presente libro.

En base esto se obtuvieron intervalos de dureza entre los 40 a 90 Shores, por lo que se compró a una empresa local llamada Xailon láminas de TPU (poliuretano termoplástico) de 40, 50, 60, 70 y 80 Shores de 40x40x5 centímetros (Longitud x Altura x Grosor). De cada lámina comprada se obtuvieron 2 cortes dientes, por lo que se probaron 2 distintas geometrías en cada una de las 4 durezas adquiridas, para un total de 10 posibles configuraciones de dureza y geometría evaluadas ante el objetivo planteado.

6.5.6. Optimización del sistema de alimentación de energía

El objetivo de optimización del sistema de alimentación de energía, fue el de aumentar la autonomía de la herramienta y disminuir el peso de la herramienta. Para esta optimización se evaluaron otros tipos de celdas de carga, capaces de garantizar las mayores prestaciones de energía con un mejor peso. Teniendo en cuenta los requerimientos de corriente expuestos en la sección 6.4.5, sabemos que se requiere una batería de entre 6Ah a 10Ah a 6V. Por lo que luego de analizar las posibles celdas de carga a usar, se decidió usar baterías tipo lipo por su bajo peso y gran capacidad de suministrar corriente cuando se necesaria. La batería escogida acorde con los requerimientos del sistema fue:



Ilustración 105. Batería lipo seleccionada [67]

Las principales características de la batería seleccionada son:

- Dimensiones: 147mm x 43mm x 17mm
- Voltaje de salida: 7.4V
- Capacidad de corriente: 5000mAh
- Tasa de descarga: 20-30C
- Plug de carga: Plug balanceado
- Marca: TURNIGY
- Peso completo: 291g

6.6. DISEÑO ELECTRÓNICO

El sistema de electrónica de potencia de la herramienta se basa principalmente en el control de la distancia de separación entre los brazos y la velocidad de giro de los motores del extremo de la herramienta, por lo que se estructuró el diseño para enfocarlo en estos dos aspectos. A continuación, se ilustra los principales elementos del sistema de electrónica de potencia de la herramienta y su ubicación:

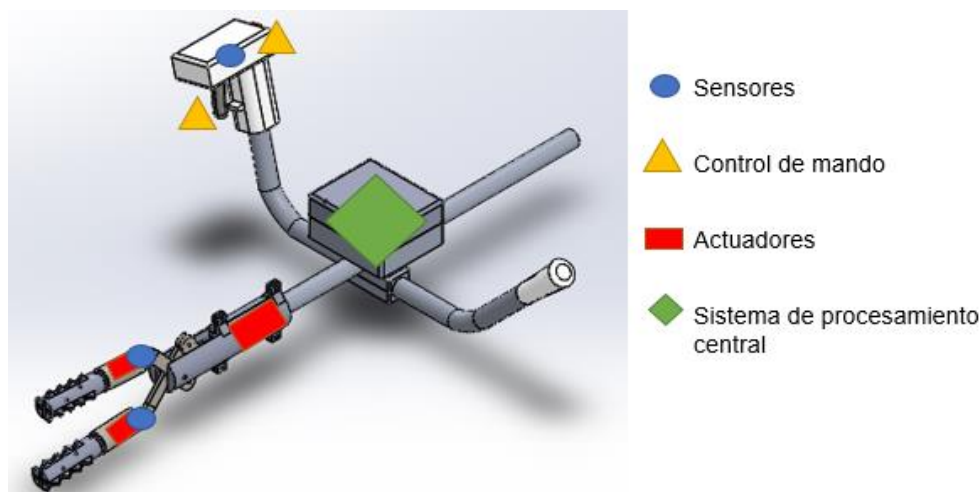


Ilustración 106. Componentes del sistema de electrónica de potencia [Autor]

6.6.1. Sistema de control de apertura de brazos

El sistema de control de apertura de brazos es controlado por un actuador lineal y accionado por un botón de tres estados ubicado en el mando de control, como se muestra en la figura 103. El circuito electrónico que se muestra a continuación controla el avance o retroceso del actuador lineal. El actuador lineal escogido tipo R, posee tres entradas: dos de alimentación y una de sentido de movimiento. Se interrumpió una entrada de alimentación con un circuito de conmutación conformado por un transistor de switcheo, esta entrada es accionada por los estados del botón generando unos estados lógicos necesarios en el código de control en Arduino que se anexa a este trabajo, para mantener los estados lógicos fue necesario ubicar resistores pull down en estas entradas. La entrada del actuador lineal que controla el sentido de movimiento es alimentada por una señal PWM proveniente del Arduino, que según el periodo de la señal cambia el sentido de movimiento del eje del actuador lineal.

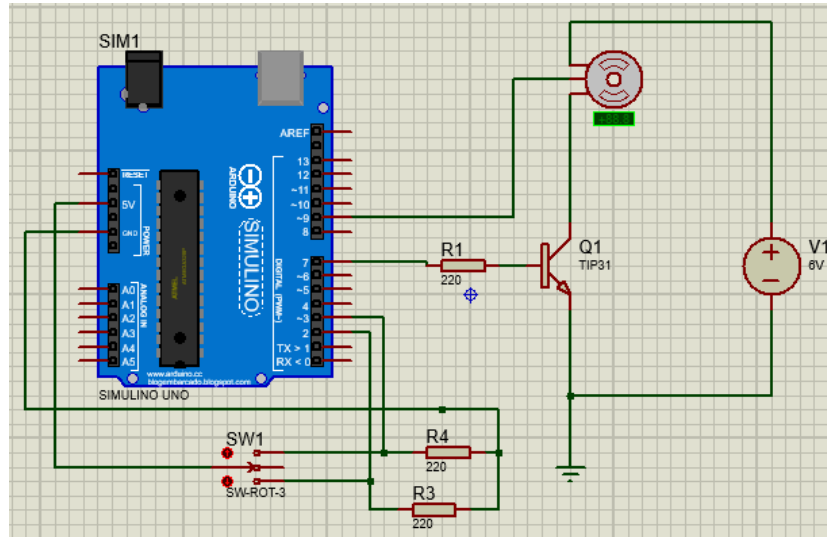


Ilustración 107. Esquema de circuito de control del actuador lineal [Autor]

6.6.2. Sistema control de velocidad de los motores del extremo

El sistema de control de velocidad de los motores del extremo se encarga de regular la velocidad de giro de los dientes del extremo de la herramienta, mediante el accionamiento de un freno como se indicó en capítulos anteriores. El circuito electrónico mostrado a continuación controla la velocidad de giro de los motores mediante una señal PWM que es proporcional a la variación angular de un potenciómetro lineal que se mueve con el freno de accionamiento. Los motores usados en este circuito poseen 4 entradas y 2 salidas, las cuales corresponde a la alimentación del motor, alimentación del encoder y señales de salida del encoder.

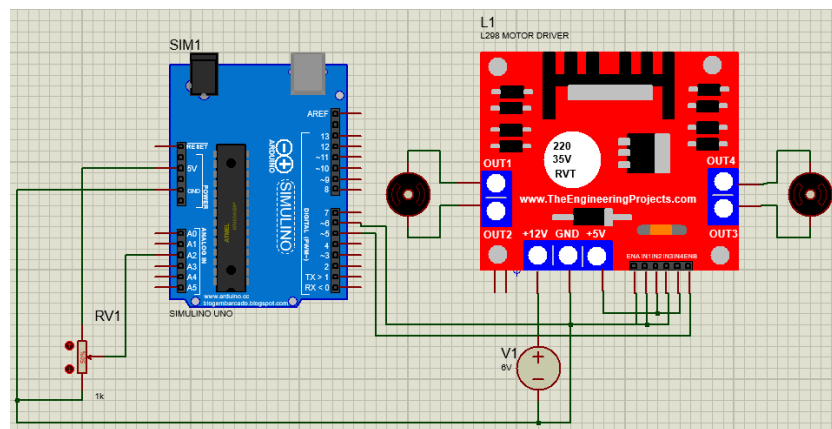


Ilustración 108. Esquema de circuito de control de velocidad [Autor]

6.7. PLANOS DE CONSTRUCCIÓN Y LISTA DE MATERIALES

Los planos de construcción del prototipo se encuentran con medidas en milímetros. Los planos de construcción y lista de materiales se adjuntan como anexos al libro.

Con el objetivo de evaluar la funcionalidad del prototipo y reducir el peso de la herramienta considerablemente, se imprimieron algunas piezas de la herramienta en PET G. Por lo que se dejó el diseño planteado para materiales metálicos y el prototipo se probó en PET G, sin embargo su rendimiento no fue el esperado. Por esto se rehicieron las piezas en acetal, acero inoxidable y aluminio.

6.8. VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO

Con el fin de evaluar la funcionalidad del prototipo se definieron 3 aspectos importantes para establecer su buen funcionamiento: porcentaje de recolección de granos en total, porcentaje de recolección de granos rojos y porcentaje de recolección de frutos verdes. Para dar lugar a una evaluación objetiva se diseñó el siguiente plan de pruebas:

PLAN DE PRUEBAS

Objetivo de la prueba:

Determinar la configuración capaz de desprender el mayor número de frutos de café maduros en el menor tiempo, de 200g de café recolectado.

Pasos para la prueba:

- 1) Recolectar 100g de café de un árbol con densidad media de frutos de café maduros y se medirá el tiempo que se tarda en alcanzar dicho peso.
- 2) Pesar el total de frutos verdes recolectado y el total de frutos maduros recolectados.
- 3) Recolectar 100g de café de un árbol con densidad alta de frutos de café maduros y se medirá el tiempo que se tarda en alcanzar dicho peso.
- 4) Pesar el total de frutos verdes recolectado y el total de frutos maduros recolectados.
- 5) Repetir la prueba una vez más para la misma configuración. Para un total de 400g recolectados por configuración.
- 6) Repetir la prueba para las demás configuraciones.

Una vez concluyó la prueba, se analizó la mejor configuración según el porcentaje de frutos maduros recolectados y el tiempo de recolección de estos. El prototipo fue probado en campo en dos ocasiones, la primera según los parámetros iniciales establecidos y la segunda luego de realizar las modificaciones respectivas observadas en la prueba 1, que dieron lugar al diseño final planteado.

RESULTADOS 1

A pesar del diseño del plan de pruebas, no se pudo implementar debido a que la densidad de frutos de café cosechables durante los primeros meses del año es casi nula o muy reducida; como se ilustra a continuación:



Ilustración 109. Árboles de café usados para la validación [Autor]

Es por ello que para validar el funcionamiento del prototipo se hicieron pruebas más subjetivas, ya que el volumen de cosecha no era el esperado. Se hicieron recolección de varias ramas con densidad de frutos mixta y sólo frutos verdes. Las ramas con frutos verdes fueron usadas para evaluar la capacidad de desprender frutos de café de la herramienta, indiferente de su madurez. Las ramas con frutos mixtos fueron usadas para evaluar la capacidad de la herramienta para desprender frutos maduros, pero no verdes.

Como se indicó en la sección 6.5.4. se obtuvieron 10 configuraciones posibles de dientes según su dureza y geometría, de los cuales se probaron 6 configuraciones. Esto debido a que se empezó a probar desde la mayor a la menor dureza y al llegar a una dureza de 40 Shores, se observó que los dientes no eran capaces de desprender los frutos de café por lo que se concluyó que durezas menores a los 40 Shores no eran adecuadas para el prototipo y se descartaron.



Ilustración 110. Prueba de desprendimiento de frutos maduros [Autor]



Ilustración 111. Prueba de rendimiento de desprendimiento [Autor]

Las durezas de 70, 60 y 50 Shores fueron capaces de desprender frutos de café con una alta eficiencia de recolección. La dureza de 70 Shores fue capaz de desprender los frutos de café sin problema, aunque no discriminaba entre verdes y maduros durante el desprendimiento. La dureza de 60 Shores fue capaz de desprender los frutos de café fácilmente, dejando un pequeño porcentaje (por debajo del 25%) de frutos verdes sobre la rama. La dureza de 50 Shores fue capaz de desprender los de café fácilmente, dejando un alto porcentaje (por encima del 25%) de frutos maduros sobre la rama.

RESULTADOS 2

Esta segunda prueba se realizó en el mes de octubre, se encontró una mayor densidad de frutos y se realizaron mayor número de pruebas. Sin embargo, el

rendimiento de la herramienta no fue el esperado, lo que impidió alcanzar el volumen de prueba planteado. El consumo de corriente del motor era muy elevado a bajas velocidades y dado el sistema de electrónica de potencia diseñado, la corriente que recibía el motor era limitada por lo que la prueba se desarrolló a la máxima velocidad de los motores.



Ilustración 112. Arboles de café usados para la validación 2 [Autor]

Para esta validación se hicieron recolección de varias ramas con densidad de frutos mixta y sólo frutos verdes. Las ramas con frutos verdes fueron usadas para evaluar la capacidad de cada dureza para no desprender frutos. Las ramas con frutos mixtos fueron usadas para evaluar el comportamiento de la herramienta durante la recolección y el impacto al cafeto.

Como se indicó en la sección 6.5.4. se obtuvieron 10 configuraciones posibles de dientes según su dureza y geometría, de los cuales se probaron 6 configuraciones. Dado que para esta prueba se usaron durezas de 50, 70 y 90 Shores, en dos geometrías diferentes (diente triangular y redondo).



Ilustración 113. Prueba de desprendimiento de frutos maduros e impacto al cafeto [Autor]

La dureza de 70 Shores fue capaz de desprender frutos de café con una alta eficiencia de recolección. Las durezas de 90 y 50 Shores presentaron problemas de consumo de corriente, ya que se entrapaban o frenaban los motores del extremo de la herramienta. Por lo que la prueba sirvió para reiterar la efectividad de las durezas ya analizadas y plantear escenarios de mejora en el prototipo a la hora de plantearlo como un producto final.



Ilustración 114. Volumen de frutos totales recolectados [Autor]

7. CONCLUSIONES

- Se concluyó de la primera etapa de pruebas que la herramienta es capaz de cumplir con todos los objetivos de diseño, así mismo que la dureza que mejor responde ante la necesidad planteada es de 50 Shores. Sin embargo, se observó que los dientes tienden a fragmentarse por lo que habría que probar con durezas cercanas mayores a los 50 Shores. De esto podemos concluir, que el intervalo de dureza que cumplen las necesidades planteadas se encuentra entre los 50 a 60 Shores.
- Se concluyó de la primera etapa de pruebas que es necesario realizar ajustes al diseño de la herramienta, ya que se presentaron algunas dificultades durante la prueba. Tales como:
 - Disminuir la distancia estándar entre los dientes, ya que en algunos casos la densidad de frutos en la rama no permite el desprendimiento adecuado con el diseño planteado.
 - Disminuir el tamaño de los dientes y eje de soporte de estos, ya que la distancia entre ramas en algunos escenarios es inferior a lo esperada y el prototipo actual posee dificultades de acceso a dichas ramas.
- Se concluyó de la primera etapa de pruebas que la herramienta posee un peso adecuado para el desempeño en campo, sin embargo se podría reducir aún más el peso de la herramienta para futuras optimizaciones. Ya que, debido a las vibraciones generadas y su peso actual, luego de un intervalo reducido de tiempo genera fatiga en el operador.
- Se concluyó de la segunda etapa de pruebas que para la herramienta es necesario plantear un sistema de electrónica de potencia capaz de regular un consumo de corriente superior a la corriente pico de los motores. Se observó en contraste, con los dientes de la prueba anterior para esta no se presentaron fragmentación, ni fisuras en la estructura de los dientes. Esto se atribuye a la mejora realizada en el sistema de sujeción de los dientes y su geometría misma, de lo que se concluyó que al aumentar el área de contacto de los dientes con la superficie de sujeción se aumenta la vida útil de los dientes.
- Se concluyó de la segunda etapa de pruebas que la disminución del tamaño de los dientes y las dimensiones generales de la herramienta dieron lugar a una mayor accesibilidad al cafeto. Esto generó que se pudiese aumentar el número de frutos de café cosechables por la herramienta, optimizando la

capacidad de recolección y aumentando el porcentaje de frutos maduros recolectados.

- Se observó durante la evaluación de las geometrías de los dientes, que ambas geometrías obtienen un desempeño similar. Sin embargo, la geometría de dientes triangular genera un desgarre en la capa exterior del fruto de café, que no se observa cuando se usa la geometría de dientes redondos.
- De lo anteriormente descrito se concluyó que la mejor configuración dureza/geometría para los dientes de la herramienta, fue la de 70 Shores / diente redondo. Se recomienda ampliar las pruebas generar una validación más acertada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. N. d. Cafeteros, «Federación Nacional de Cafeteros,» Enero 2014. [En línea]. Available: <https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/EEC30.pdf>. [Último acceso: 22 Enero 2018].
- [2] F. N. d. Cafeteros, «Federación Nacional de Cafeteros,» [En línea]. Available: https://www.federaciondecafeteros.org/clientes/es/sala_de_prensa/detalle/197_de_fincas_cafeteras_son_autosuficientes_en_mano_de_obra/. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [3] Cenicafe, «Cenicafe,» Diciembre 2013. [En línea]. Available: [http://www.cenicafe.org/es/publications/arc056\(01\)037-049.pdf](http://www.cenicafe.org/es/publications/arc056(01)037-049.pdf). [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [4] Café de Colombia, «Café de Colombia,» [En línea]. Available: <http://www.cafedecolombia.com>. [Último acceso: 28 Enero 2018].
- [5] Bedri, «Bedri,» [En línea]. Available: http://www.bedri.es/Comer_y_beber/Cafe/El_cafe_en_el_mundo.htm. [Último acceso: 28 Enero 2018].
- [6] Organización Internacional del Café, 2013.
- [7] 20 minutos, «El mapa del consumo de café en el mundo,» *20 minutos*, 16 Abril 2017.
- [8] J. Arcila P., F. Farfán V., A. Moreno B., L. F. Salazar G. y E. Hincapié G., Sistemas de producción de café en Colombia, Chinchiná: Editorial Blanecolor Ltda., 2007.
- [9] Lavazza, «Lavazza,» [En línea]. Available: http://www.lavazza.com/csa/coffee-passion/our-coffee/coffee_harvest/. [Último acceso: 29 Enero 2018].
- [10] SerSol Campo, «Servicios y soluciones para el campo,» 12 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.sersolcampo.com/importancia-de-la-agricultura-y-la-tecnologia/>. [Último acceso: 2018 Febrero 2].

- [11] F. «Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/sustainable-agricultural-mechanization/overview/whatisustainablemechanization/es/>. [Último acceso: 2 Febrero 2018].
- [12] Cenicaña, «Cenicana,» 27 Octubre 2015. [En línea]. Available: <http://www.cenicana.org/web/programas-de-investigacion/agronomia/geomatica/agricultura-de-precision>. [Último acceso: 3 Febrero 2018].
- [13] R. Shannon, Simulación de sistemas. Diseño, desarrollo e implementación, Trillas, México, 1988.
- [14] E. E. Tarifa, «Teoría de Modelos y Simulación,» Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires.
- [15] G. Fishman, *Conceptos y métodos en la simulación digital de eventos discretos*, Limusa, México, 1978.
- [16] L. A.M. y K. W.D., Simulation Modeling & Analysis, New York: McGraw-Hill, 1991.
- [17] B. Gaskin Espinosa, A. Martínez Rodríguez y A. Hernández Musa, «Cálculo de los parámetros de un vibrador inercial de alta frecuencia para la cosecha selectiva del café,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 15, nº 4, pp. 1-7, 2006.
- [18] B. de la Bretesche, La méthode APTE: Analyse de la valeur, analyse fonctionele, Pétrelle, 2000.
- [19] «Méthode APTE,» [En línea]. Available: <http://www.methode-apte.com/>. [Último acceso: 22 Febrero 2018].
- [20] Pdcahome, «Pdcahome,» [En línea]. Available: <https://www.pdcahome.com/diagrama-fast/>. [Último acceso: 25 Febrero 2018].
- [21] Y. Akao, «Development History of Quality Function Deployment». The Customer Driven Approach to Quality Planning and Deployment, Tokyo, Japón: Asian Productivity Organization, 1997, p. 339.

- [22] L. Guinta y N. C. Praizler, *The QFD Book, The Team Approach to Solving Problems and Satisfying Customers Through Quality Function Deployment*, AMACOM Books, 1993.
- [23] J. R. Hauser y D. Clausing, «The House of Quality,» *Harvard Business Review* May - June, 1988.
- [24] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, «CONCURSO - Proyecto de Apoyo a la Cosecha Asistida de Café,» 2017.
- [25] D. Juárez Varón, R. Balart Gimeno, S. Ferrándiz Bou y D. García Sanoguera, «Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos,» *3Ciencias*, 2012.
- [26] BASF, «Elastómero de poliuretano termoplástico,» PU Solutions Elastogran.
- [27] Pololu, «Pololu,» [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/1572>.
- [28] E. Monterrubio, J. Cebrián y G. Lucas, «Elevador Hidráulico,» Armeria Eskola, 1 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/grupocelevadorhidraulico/esfuerzos?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>. [Último acceso: 27 Noviembre 2018].
- [29] E. L. Moreno Cárdenas, C. Oliveros y F. Álvarez Mejía, «A portable device to assist in the harvest of coffee in Colombia,» *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, Enero 2015.
- [30] C. E. Oliveros Tascón, R. Benítez Mora, F. Álvarez Mejía, I. D. Aristizabal Torres, C. A. Ramírez Gómez y J. R. Sanz Uribe, «Cosecha de café con vibradores portátiles del tallo,» *Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 58, 2005.
- [31] E. A. García Galeano, C. E. Oliveros Tascón, F. Álvarez Mejía y E. C. Montoya Restrepo, «Cosecha de café mediante impacto a las ramas,» *Cenicafé*, vol. 52, 2001.
- [32] D. Díaz Gaitan, C. A. Ramírez Gómez, C. E. Oliveros Tascón y E. L. Moreno Cárdenas, «Cosecha de café con el equipo portátil STIHL 81, de actuadores oscilantes,» *Cenicafé*, vol. 60, 2009.

- [33] F. Álvarez Mejía, C. E. Oliveros Tascón y J. R. Sanz Uribe, «Evaluación de batidores mecánicos en la cosecha del café,» *Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 66, 2013.
- [34] P. Morrissey, «Ecofriendly coffee,» 1 Julio 2008. [En línea]. Available: <https://ecofriendlycoffee.org/mechanical-harvesting-on-a-coffee-farm/>. [Último acceso: 2018 Enero 25].
- [35] C. E. Oliveros Tascón, C. A. Ramírez Gómez, R. Acosta Acosta y F. Álvarez Mejía, «Equipo portátil para asistir la cosecha manual de café,» *Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, vol. 58, nº 2, 2005.
- [36] C. E. Oliveros Tascón, C. A. Ramírez Gómez, J. D. Buenaventura Aranzazu y J. R. Sanz Uribe, «Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual de café,» *Cenicafé*, vol. 56, nº 1, 2005.
- [37] C. A. Ramírez Gómez, C. E. Oliveros Tascón, J. R. Sanz Uribe, R. Acosta Acosta y J. D. Buenaventura Aranzazu, «Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café - descafé,» *Cenicafé*, vol. 57, nº 2, 2006.
- [38] L. M. Chuaire, C. E. Oliveros Tascón, P. Benavides Machado, J. C. Gómez Soto, C. A. Serna Giraldo, C. A. Ramírez Gómez, R. Medina y A. Arcila, «Recolección de frutos de café del suelo con canastilla: Herramienta para el manejo integrado de la broca,» *Avances Técnicos Cenicafé*, 2016.
- [39] F. d. M. UNAL, «Universidad Nacional de Colombia,» 27 Febrero 2017. [En línea]. Available: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/1488-proponen-maquina-para-optimizar-el-proceso-de-recoleccion-de-cafe-en-antioquia>. [Último acceso: 2018 Enero 26].
- [40] D. Casner, J. Renaud, R. Houssin y D. Knittel, «A novel design approach for mechatronic systems based on multidisciplinary design optimization,» de *ICAM 2012: International Conference on Automation and Mechatronics*, Oslo, Norway, 2012.
- [41] Organización Internacional del Café, «Informe del mercado de Café,» 2016.
- [42] Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, «Guía sobre prácticas de conservación de suelos,» La Lima, Cortés, 2004.

- [43] F. S. Gonzáles Huiman, «Diplomado 2007 UNAS,» 1 Noviembre 2007. [En línea]. Available: <http://diplomado2007unas.blogspot.com.co/2007/11/>.
- [44] L. Monayo Navia, «Sombrio cafe flor,» 11 Abril 2009. [En línea]. Available: <http://sombriocafeflor.blogspot.com.co/2009/04/sombrio-y-proteccion-del-suelo.html>.
- [45] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, «Comité de Cafeteros de Norte de Santander,» 2008. [En línea]. Available: https://nortedesantander.federaciondecafeteros.org/fnc/inc_nuestro_cafe/category/118.
- [46] God's Speed, «God's Speed,» 25 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://godsspeedenergy.com/blog/caffeine-from-the-bean-extracted-vs-synthetic-caffeine/>. [Último acceso: 2018 Enero 31].
- [47] C. Coffee, «Canterbury Coffee,» [En línea]. Available: <http://www.canterburycoffee.com/learn-to-brew-coffee/coffee-bean-to-cup/>. [Último acceso: 2018 Enero 30].
- [48] J. Shuler, «Casa Brasil,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.casabrasilcoffees.com/learn/harvesting/methods-of-coffee-harvesting-selective-and-strip/>. [Último acceso: 2018 Enero 31].
- [49] Coffee Museum, «Coffee Museum,» 4 Abril 2017. [En línea]. Available: <http://www.coffeemuseum.com/blog/2017/04/04/periodic-table-coffee-varieties/>. [Último acceso: 1 Enero 2018].
- [50] M. Pinza, «Servicios de cafetería,» 30 Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://serviciosdecafeteria-bar.blogspot.com.co/2013/10/el-cafe.html>. [Último acceso: 1 Febrero 2018].
- [51] H. Rayo, «Guiagro,» Enero 2017. [En línea]. Available: <http://guiagronicaragua.com/cafe-arabigo-vs-robusta/>. [Último acceso: 2018 Febrero 1].
- [52] Federación Nacional de Cafeteros, «Federación Nacional de Cafeteros,» Octubre 2016. [En línea]. Available: https://www.federaciondecafeteros.org/pergamino-fnc/index.php/comments/consejos_del_profesor_yarumo_cosecha_asistida_de_cafe1/. [Último acceso: 3 Febrero 2018].

- [53] M. Campos Vélez, «El Día,» 16 Noviembre 2012. [En línea]. Available: https://www.eldia.com.bo/index.php?cat=357&pla=3&id_articulo=103766. [Último acceso: 3 Febrero 2018].
- [54] C. E. Olivero T., H. A. López F., C. A. Ramírez G., J. R. Sanz U. y A. E. Bustillo P., «Recolección de frutos de café del suelo con la máquina Cifarelli V77S,» *Avances Técnicos Cenicafé*, vol. 394, Abril 2010.
- [55] B. J. C. J.S. y N. B.L., *Discrete-Event Simulation*, Segunda ed., New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [56] A. Martínez Rodríguez, D. Marcal de Queiroz, B. Gaskin Espinosa y R. Zandonadi, «Determinación de propiedades físico-mecánicas de los frutos de café (*Coffea arábica* variedad Catuai) relacionadas con la cosecha mecanizada,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 15, nº 3, pp. 22-27, 2006.
- [57] G. Alvarado A. y H. E. Ochoa F., «Características fenotípicas de componentes de Variedad Castillo en dos ambientes,» *Cenicafé*, vol. 57, nº 2, pp. 100-121, 2006.
- [58] C. Cilas, C. Godin, B. Bertrand, C. Montagnon y H. Baillères, «genetic study on several mechanical properties of the wood of *coffea arabica* and *coffea canephora*,» *Trees*, vol. 20, nº 5, pp. 587-592, 2010.
- [59] G. Araújo, S. Ferraz, F. Moreira da Silva, M. Carvlho Alves, R. Lima Bueno y P. A. Negrini da Costa, «Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee,» *Precision Agric*, vol. 13, pp. 76-89, 2012.
- [60] V. M. Martínez C., J. R. Sanz U., C. E. Oliveros T. y E. L. Moreno C., «Respuesta de los frutos de café a la espetación,» *Cenicafé*, vol. 59, nº 1, pp. 64-74, 2008.
- [61] V. M. Martínez C., J. R. Sanz U., C. E. Oliveros T. y E. L. Moreno C., «Respuesta de los frutos de café a la espetación,» *Cenicafé*, vol. 59, nº 1, pp. 64-74, 2008.
- [62] D. Electronics, «Dynamo Electronics,» [En línea]. Available: <https://www.dynamoelectronics.com/motorreductores/1011-motorreductor-premium-2kg-730rpm.html>.

- [63] B. Netion, «Baterías Netion,» [En línea]. Available: <http://baterias-netion.blogspot.com/p/ficha-tecnica.html>.
- [64] I. D. Aristizábal T., C. E. Oliveros T. y F. Álvarez M., «Propiedades físico-mecánicas del árbol de café y su relación con la mecanización de la cosecha,» *Cenicafé*, vol. 50, nº 4, pp. 313-326, 1999.
- [65] M. Motor, «Maxon Motor,» [En línea]. Available: https://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog?etcc_med=ID+Teaser&etcc_cmp=ID-Teaser-Homepage-Drivesystem&etcc_cu=onsite&etcc_var=%5bcom%5d%23en%23_d_&etcc_plc=home.
- [66] N. international, «NOC international,» [En línea]. Available: <https://www.noc.ua/online-catalog-bearings/itemdescriptionopen.html?bearing=3c6843167c437f3415&title=R-1350+ZZ>. [Último acceso: 28 Agosto 2018].
- [67] A. M. Devices, «I+D Electrónica,» I+D Electrónica, 3 Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/elementos-electromecanicos/motores-y-solenoides-1/actuadores-lineales/servoactuadores/servo-actuador-lineal-50mm-l16-r-rc-y-arduino-l16-50-63-6-r-servo-actuador-lineal-l16-r-50mm-6vdc-22-48lbf-pist%C3%B3n-a>. [Último acceso: 28 Octubre 2018].
- [68] Tdrobótica, «Tdrobótica,» 21 Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://tdrobotica.co/bateria-lipo-5000-mah-2s-20c-74v/1359.html>.

ANEXOS

Listado de materiales

Tubería

- Tubo acero inoxidable estructural 1" SCH 16 * 36 cm
- Tubo acero inoxidable estructural 1" SCH 16 * 110cm

Metales

- Aluminio macizo 2" *4" *4"
- Platina aluminio 1" *1/4" 50cm

Polímeros

- Duralón macizo 15cm*13cm*5cm
- Acetal redondo 2 1/2" * 16cm
- Acetal redondo 1 1/2" * 50cm

Laminas TPU 400*400*5 [mm]

- 40, 50, 60, 70 y 80 Shores

Tornillería

- 4) Tornillo 4mm * 1/2 "
- 6) Tuercas 4mm seguridad acero inoxidable
- 2) Tornillo prisionero 4mm * 1/2 "acero inoxidable
- 2) Tornillos 1/4 " * 1" avellanado acero inoxidable
- 4) Tornillos 4mm *2" pala acero inoxidable
- 2) Tornillo 1/4"*4" acero inoxidable
- 2) Tuerca acero inoxidable 1/4" seguridad
- 2) Tornillo 1/4" * 3/4 acero inoxidable
- 4) Tornillo 3mm * 1/2 "

Eléctrico

- 3 m cable RJ45
- Switch 3 posiciones
- Potenciómetro lineal
- 2 Moto reductores 20.4:1 - 480rpm – 5.5kg/cm
- Batería lipo 7.4V a 5Ah
- Arduino uno
- Driver L298N
- Transistor Tip 31
- Resistencias 220 Ohm

4 3 2 1

F

F

E

E

D

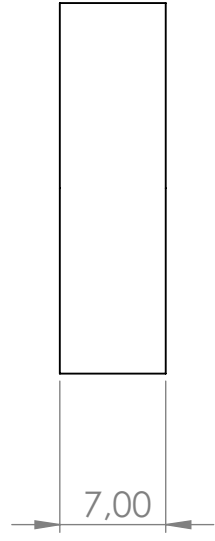
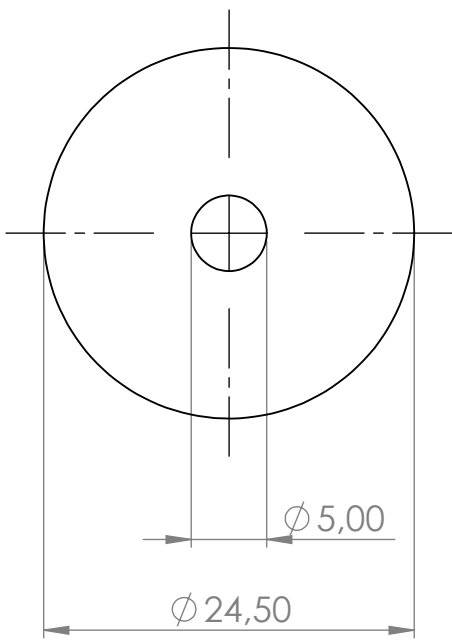
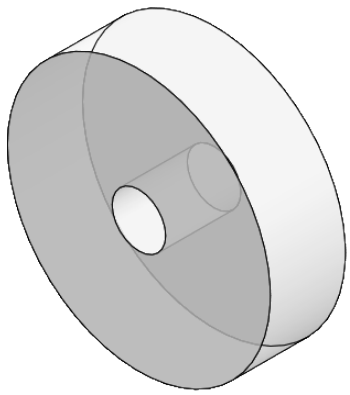
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:		
N.º DE DIBUJO		
MATERIAL:		
PESO:		
ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1	

Arendela_intermedio_fijera

A4

4 3 2 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

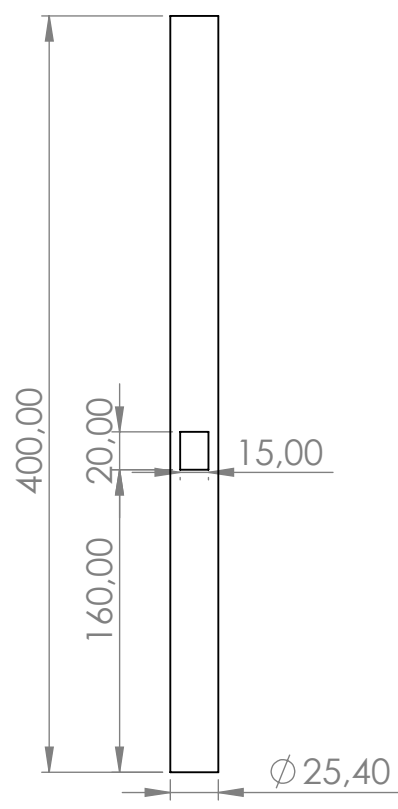
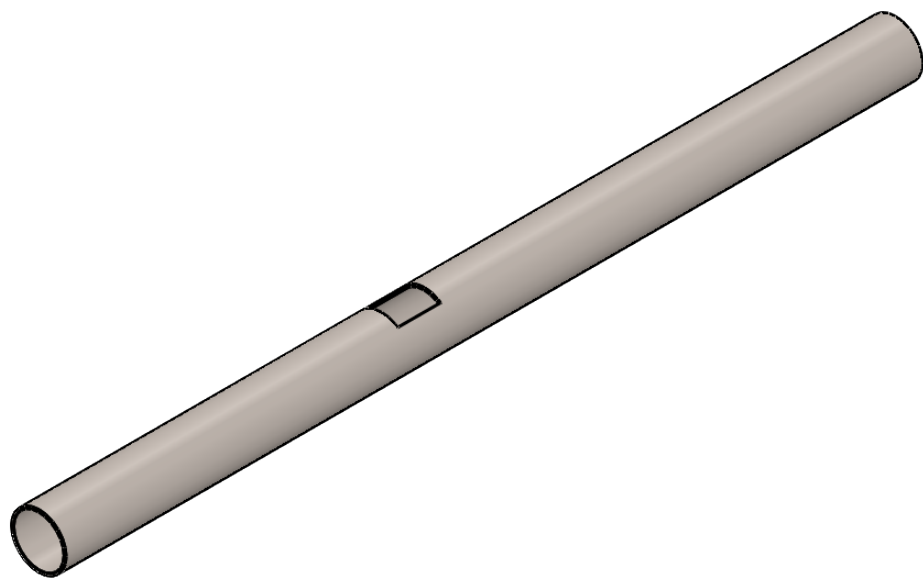
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					

CALID.		MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	

	PESO:	ESCALA:1:5	HOJA 1 DE 1
--	-------	------------	-------------

Soporte_herramienta

A4

4 3 2 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

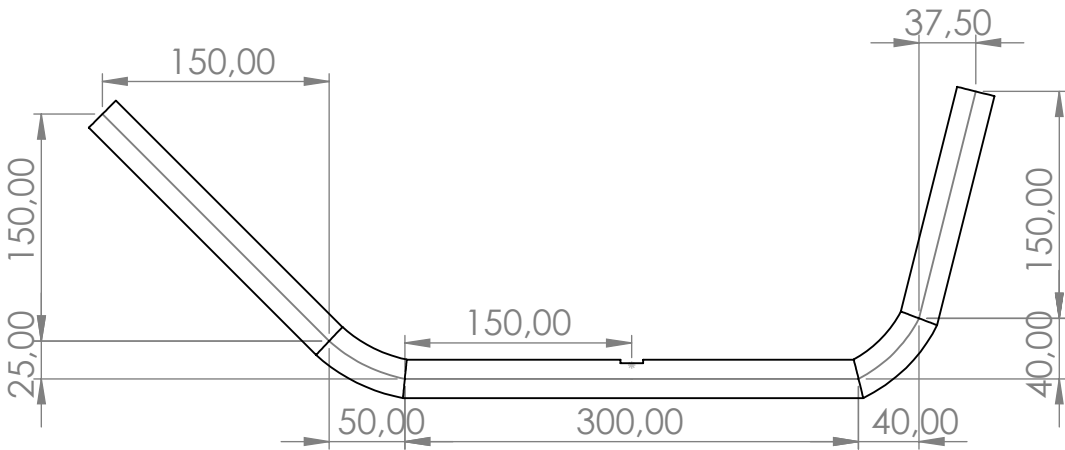
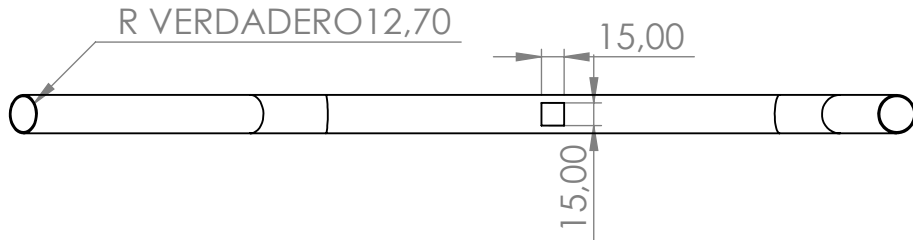
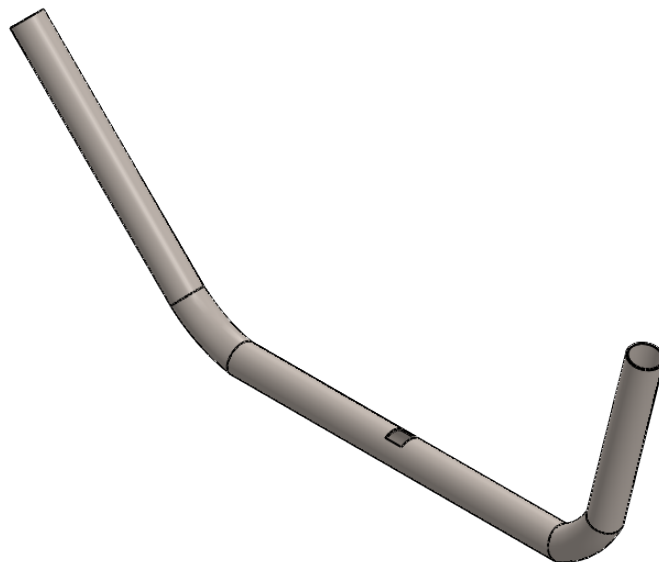
C

B

B

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

PESO:

ESCALA:1:10

HOJA 1 DE 1

Soporte_manubrio_completo

A4

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

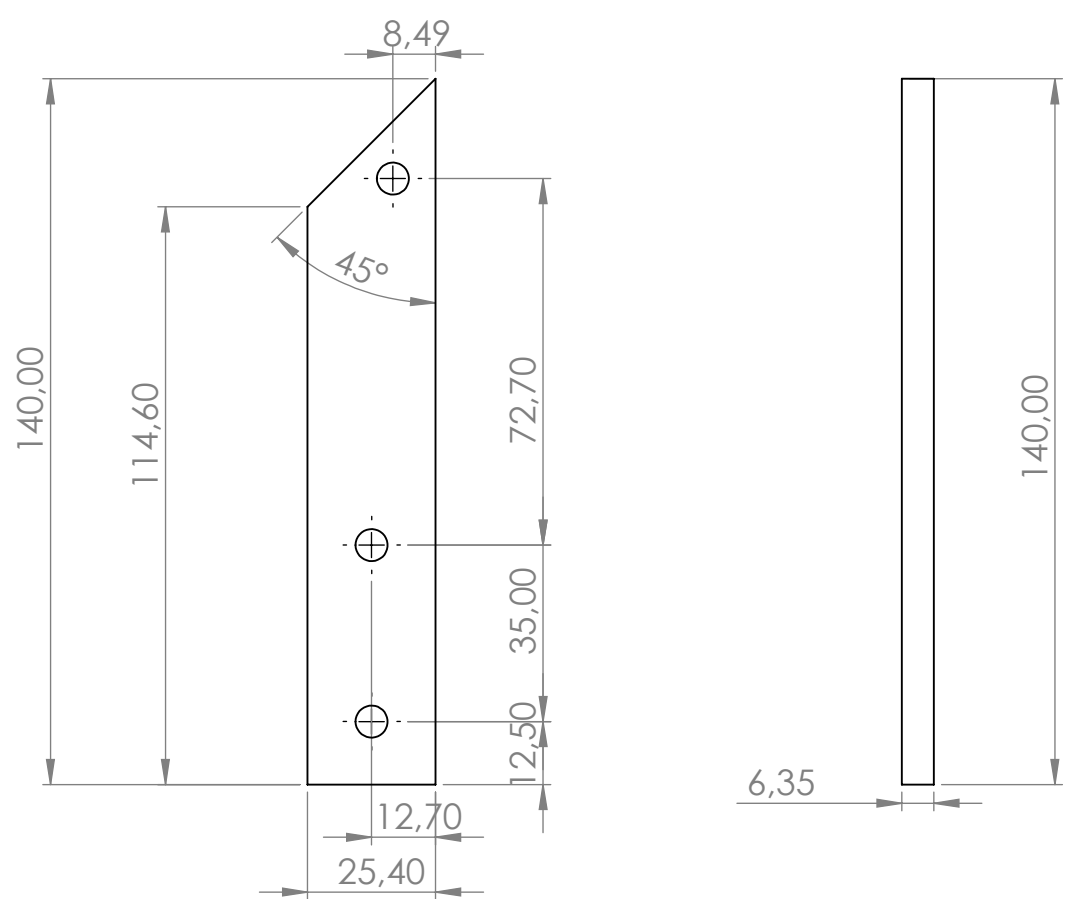
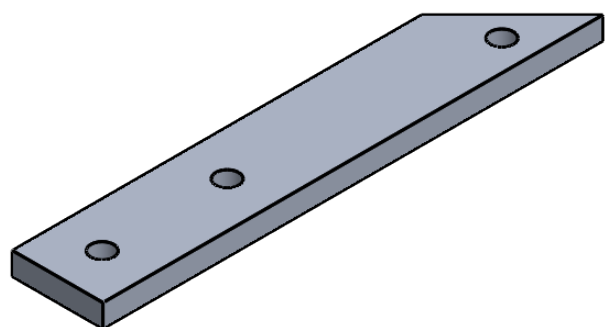
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					

CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
				Brazo_soporte_motor	
			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

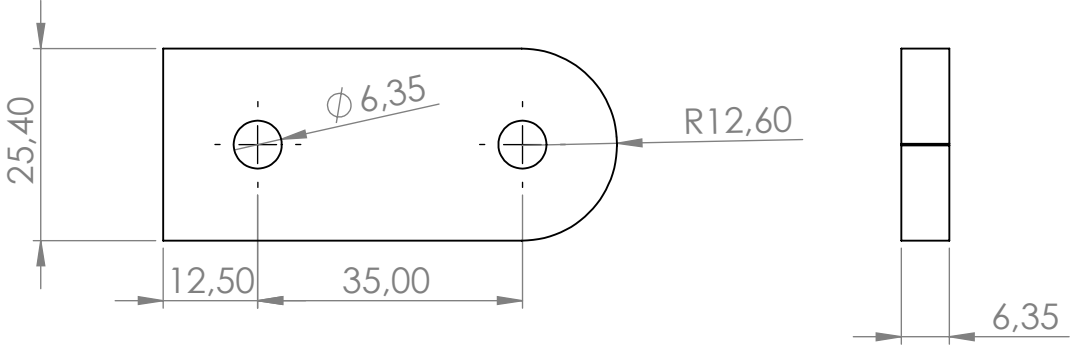
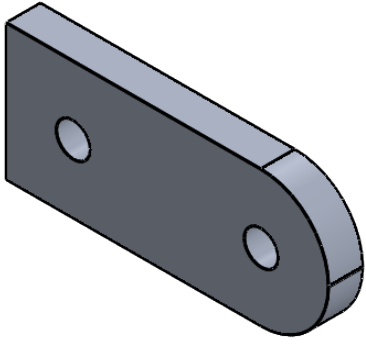
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

Eslabón_rombo_tijera

PESO:

ESCALA:1:1

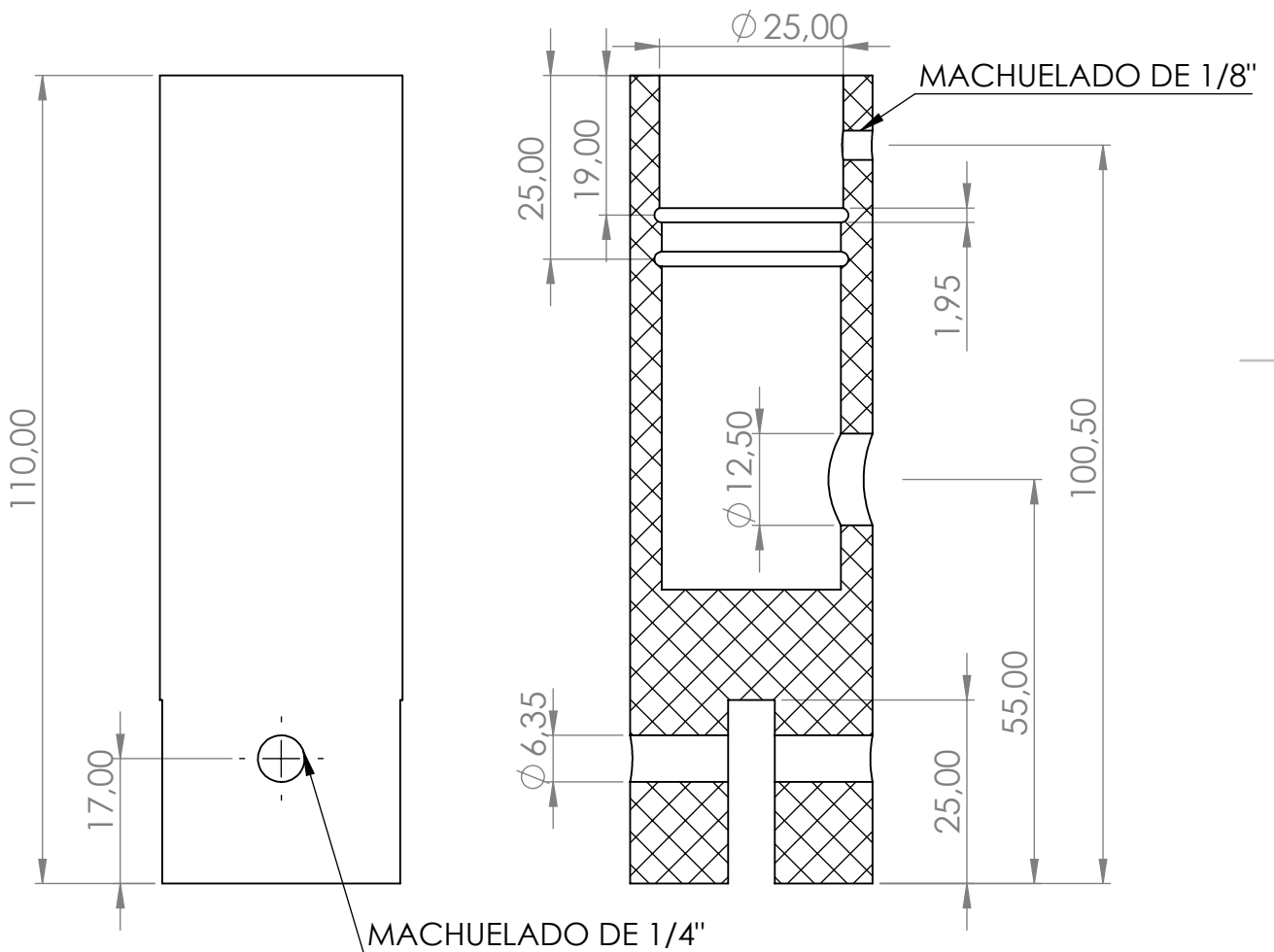
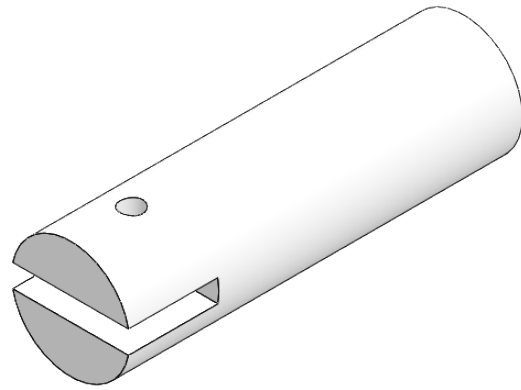
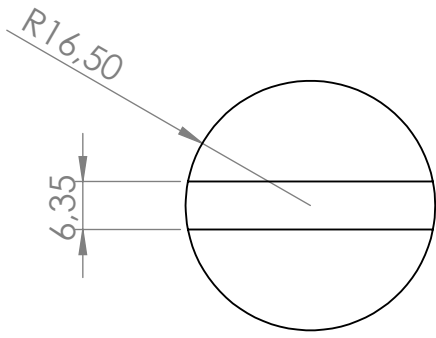
HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

A

A

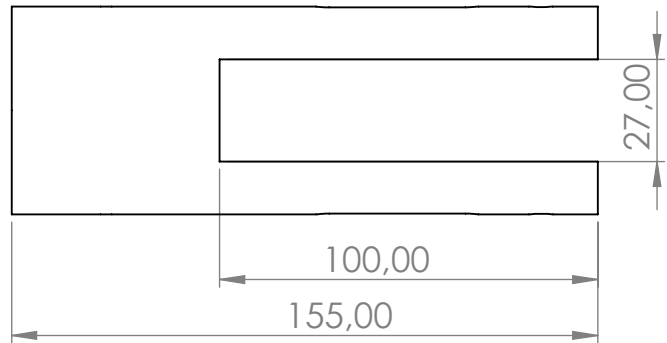
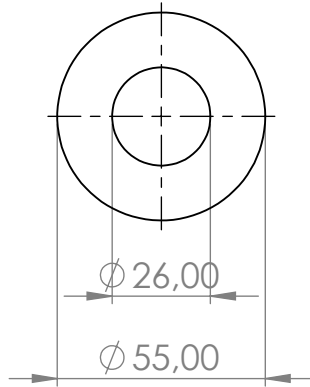
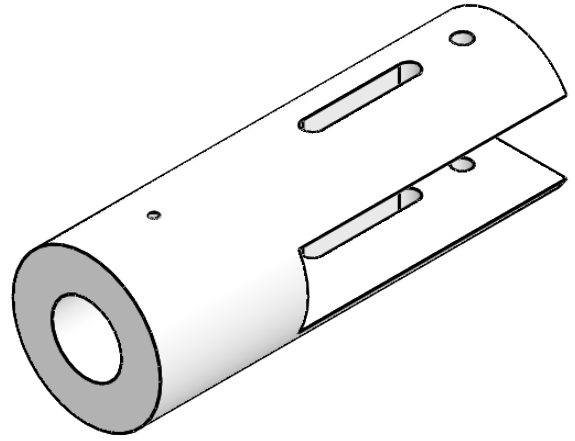
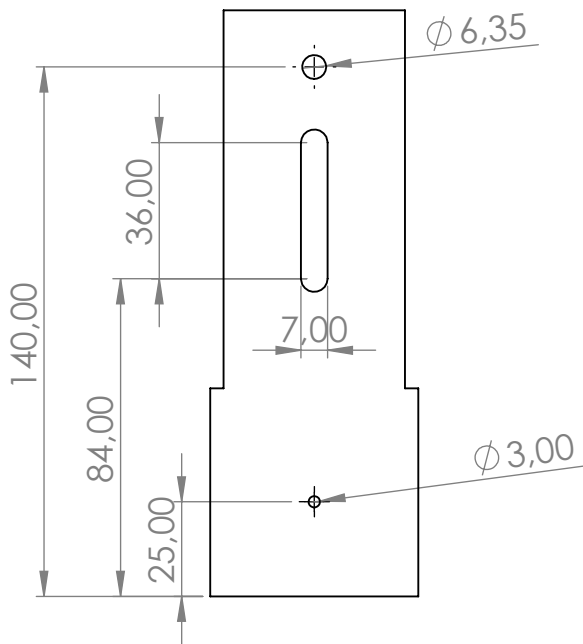
A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				

		MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
			Soporte_motor	
		PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

MATERIAL:

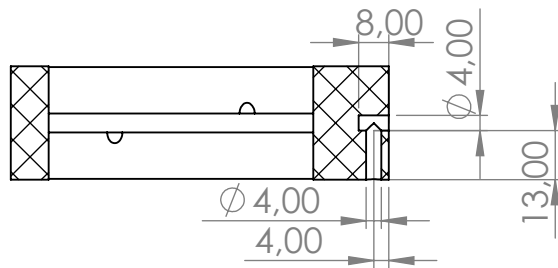
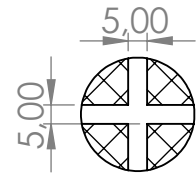
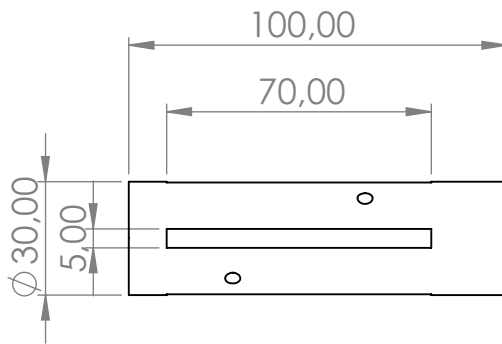
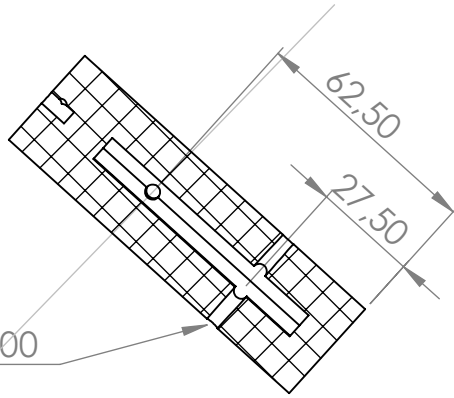
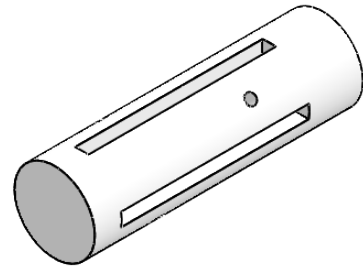
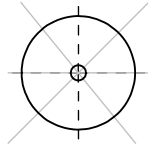
N.º DE DIBUJO

Soporte_tijera_final^{A4}

PESO:

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

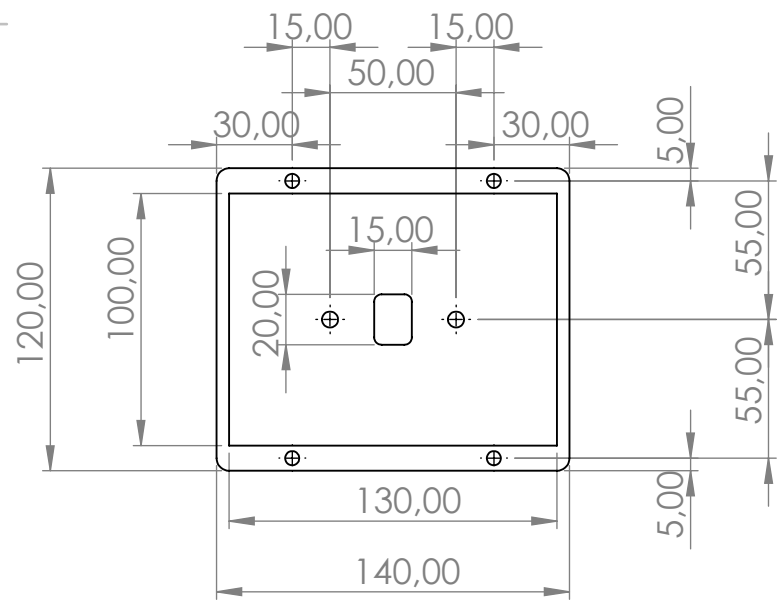
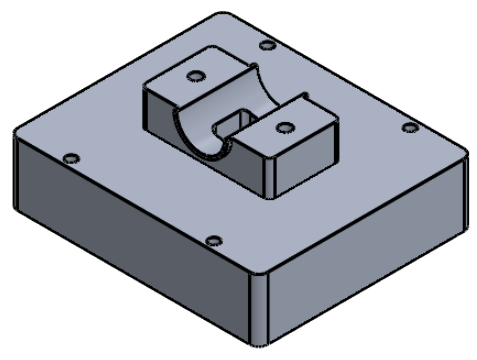
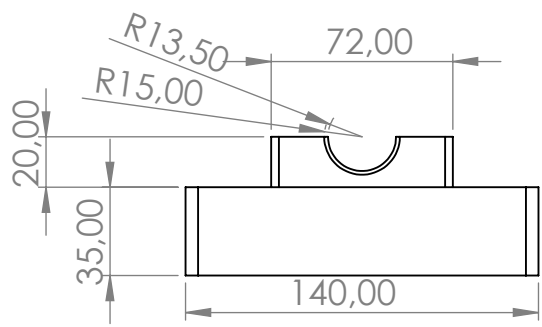
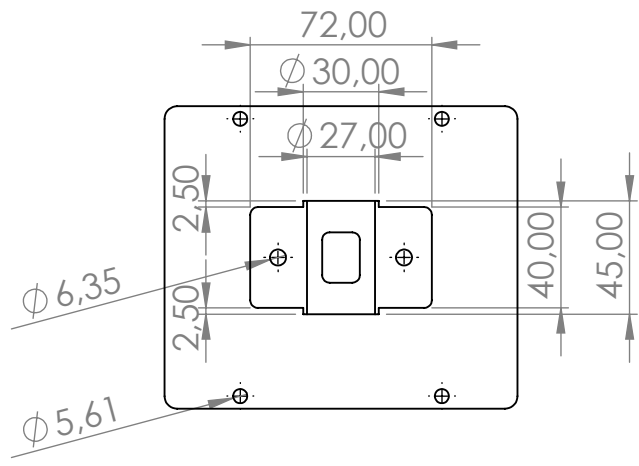
Eje_porta_elastomero_modulo

A4

PESO:

ESCALA:1:2

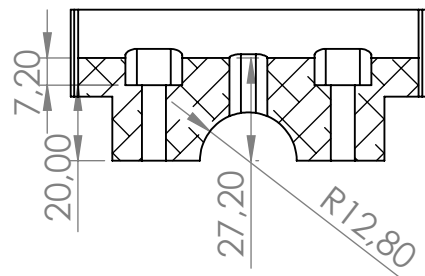
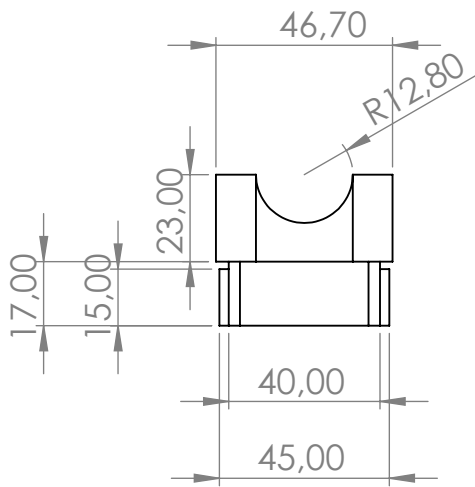
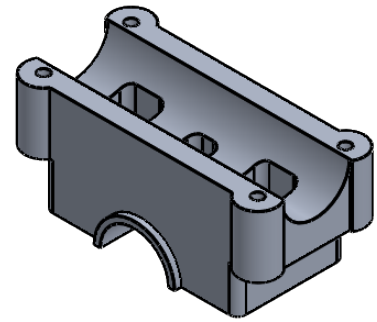
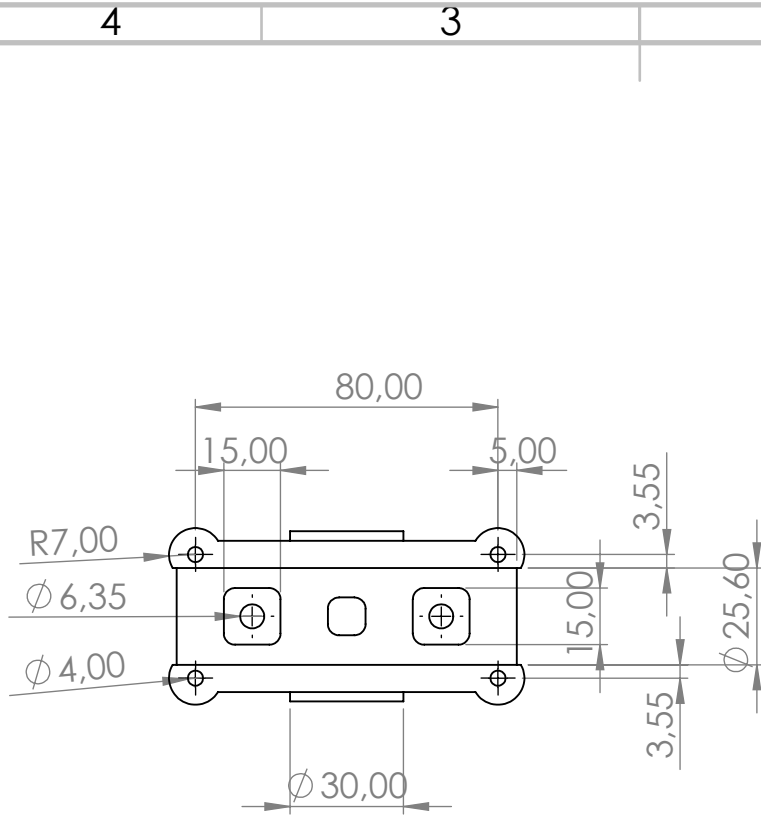
HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO		
PESO:			ESCALA:1:5		
			HOJA 1 DE 1		

Junta_union_manibrio_inferior

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

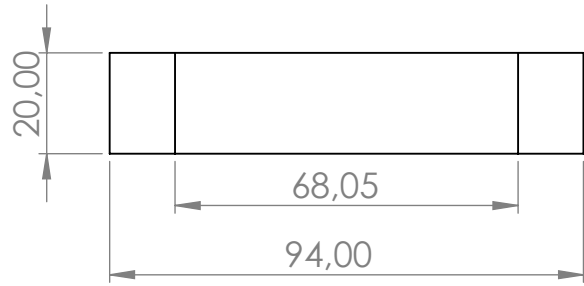
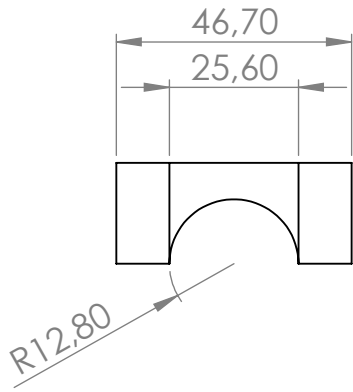
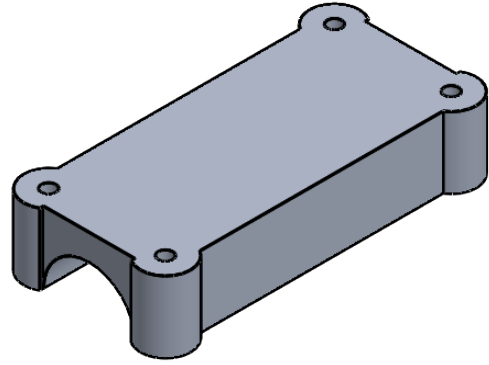
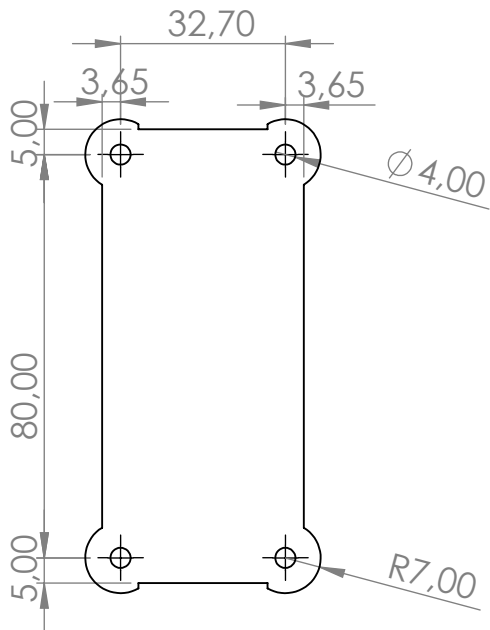
PESO:

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

Junta_union_manibrio_interme

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

PESO:

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

Junta_union_manibrio_superior

A4

4 3 2 1

F

F

E

E

D

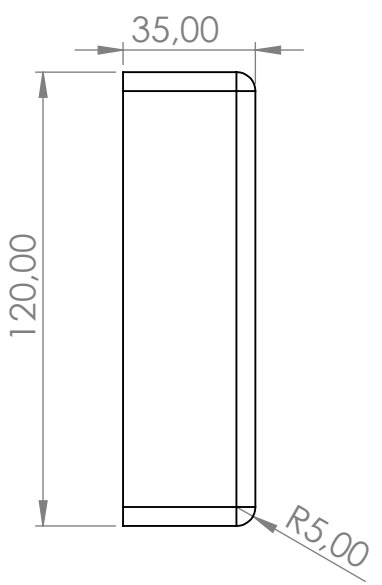
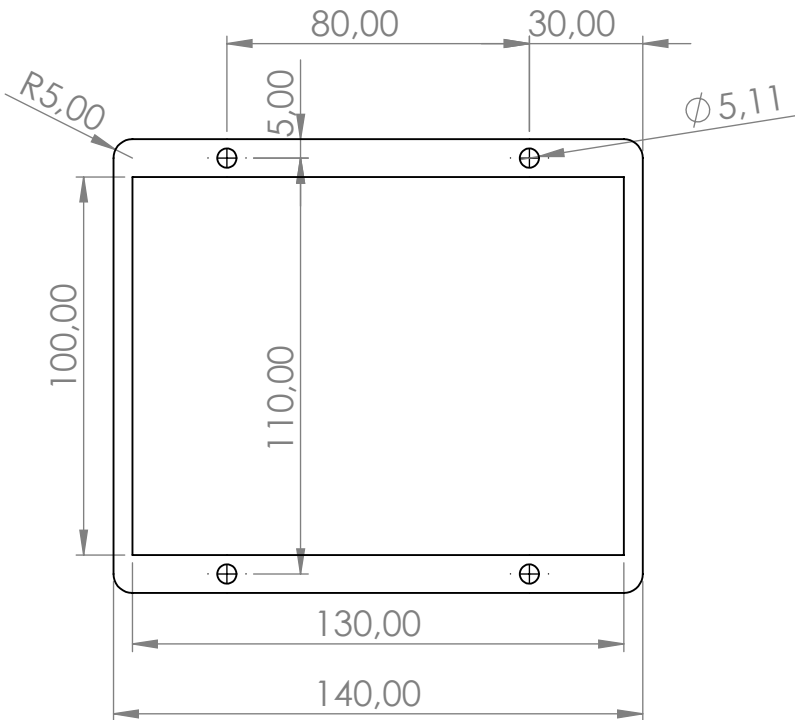
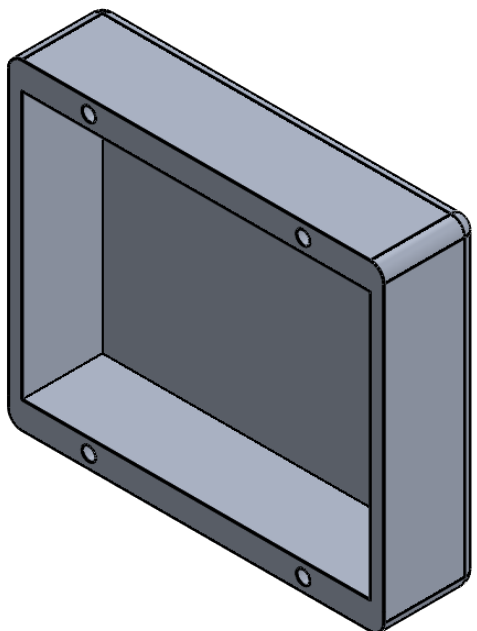
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

 N.º DE DIBUJO
 ESCALA:1:2
 HOJA 1 DE 1

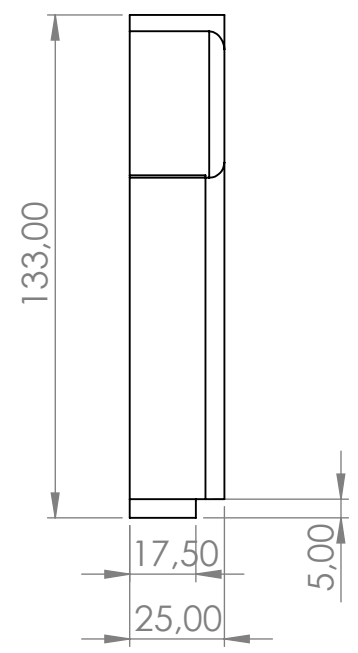
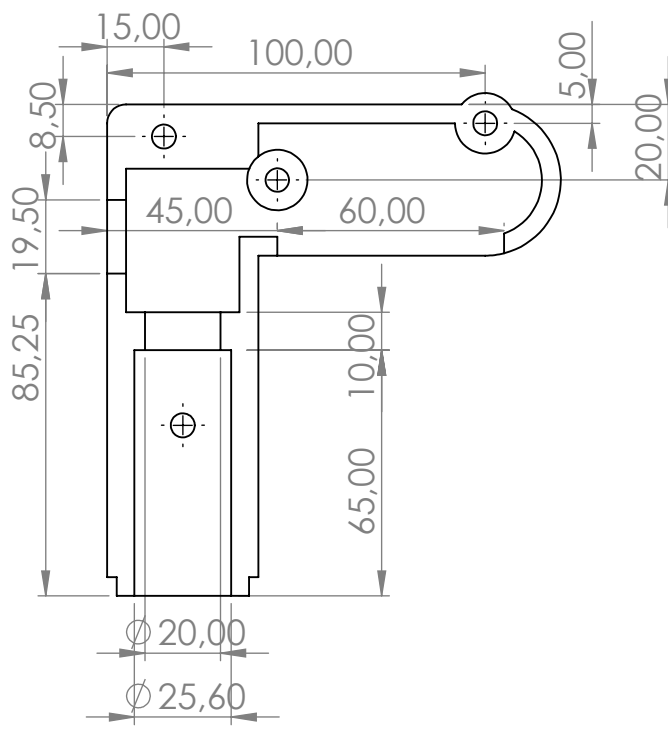
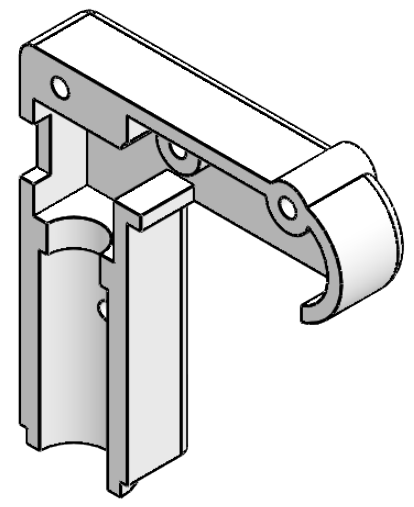
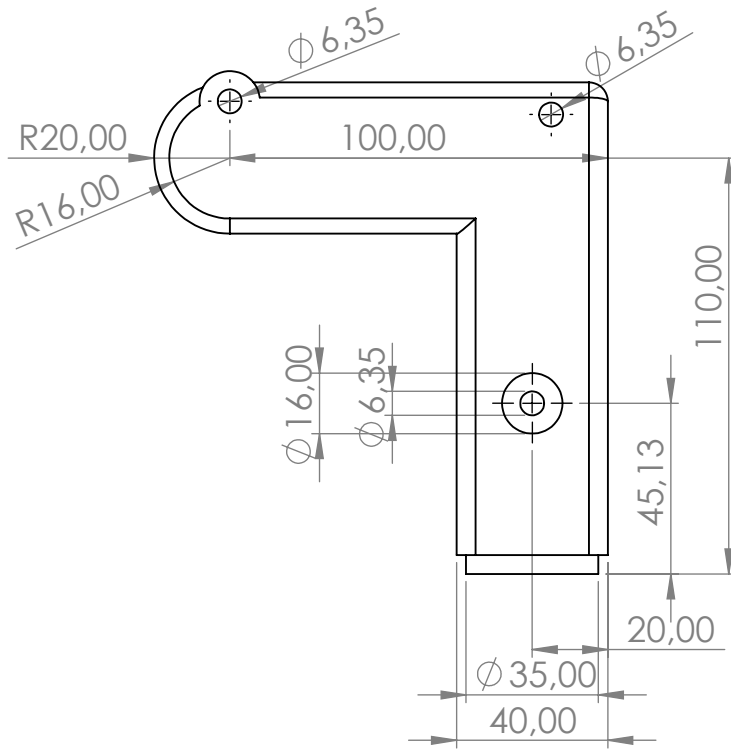
MATERIAL:
 Junta_union_manibrio_superior_t

4 3 2 1

A

A

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.		
VERIF.		
APROB.		
FABR.		
CALID.		

TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	
MATERIAL:	
PESO:	
ESCALA: 1:2	
HOJA 1 DE 1	

Mando_herramienta_der_taco

A4

4 3 2 1

F

F

E

E

D

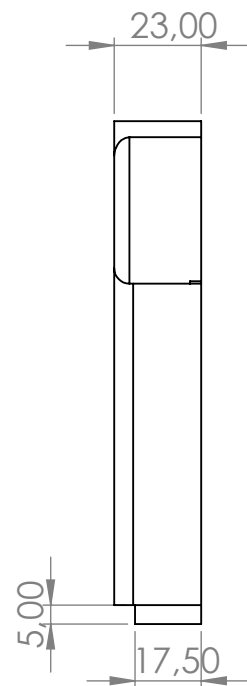
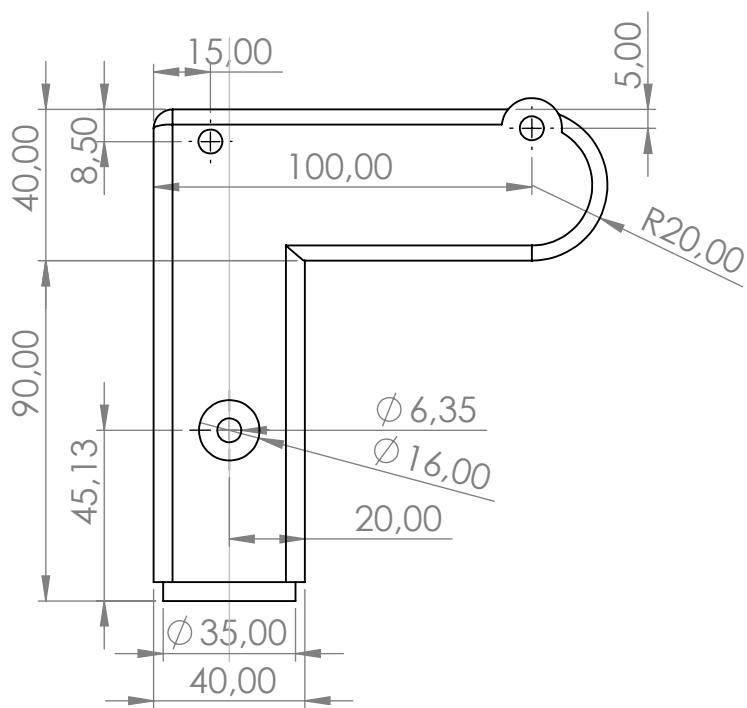
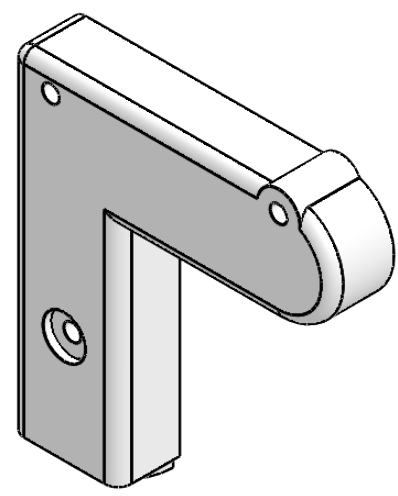
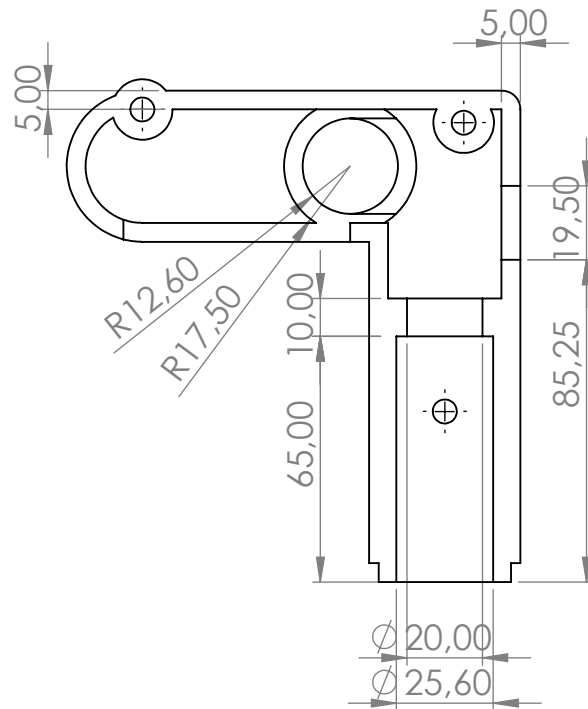
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

MATERIAL:
N.º DE DIBUJO
PESO:
ESCALA:1:2
HOJA 1 DE 1

Mando_herramienta_der_facho

A4

4 3 2 1

A

A

CODIGO FINAL IMPLEMENTADO

```
int PWM_Mot_lineal = 9;
int Retract = 2;
int Extend = 3;
int Mot_lineal = 7;
int Mot1_pwn = 6;
int Mot2_pwn = 5;
void setup() {
  Serial.begin (9600);
  pinMode(PWM_Mot_lineal, OUTPUT);
  pinMode(Retract, INPUT);
  pinMode(Extend, INPUT);
  pinMode(Mot_lineal, OUTPUT);
  pinMode(Mot1_pwn, OUTPUT);
  pinMode(Mot1, OUTPUT);
  pinMode(Mot2, OUTPUT);
  pinMode(Vcc_motlineal, OUTPUT);
  pinMode(Gnd_motlineal, OUTPUT);
}
void retract(){
  digitalWrite(PWM_Mot_lineal,HIGH);
  delay(1);
  digitalWrite(PWM_Mot_lineal,LOW);
  delay(1);
}
void extend(){
  digitalWrite(PWM_Mot_lineal,HIGH);
  delay(2);
  digitalWrite(PWM_Mot_lineal,LOW);
```

```
delay(2);  
}  
void loop() {  
do{  
digitalWrite(Mot_lineal,HIGH);  
retract();  
}while ((digitalRead(Retract)==HIGH)&&(digitalRead(Extend)==LOW));  
do{  
digitalWrite(Mot_lineal,HIGH);  
extend();  
}while ((digitalRead(Retract)==LOW)&&(digitalRead(Extend)==HIGH));  
do{  
digitalWrite(Mot_lineal,LOW);  
}while ((digitalRead(Retract)==LOW)&&(digitalRead(Extend)==LOW));  
  
int Pot_value=analogRead(A2);  
analogWrite(Mot1_pwn,((Pot_value-300)*25.5));  
analogWrite(Mot2_pwn,((Pot_value-300)*25.5));  
}
```