

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Diseño de un Robot para el secado de Café

Trabajo de graduación presentado por Alejandro Windevoxhel para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2021







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Diseño de un Robot para el secado de Café

Trabajo de graduación presentado por Alejandro Windevoxhel para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2021





Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Kurt Kellner

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
Ing. Pablo Mazariegos

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de enero de 2021.





La inspiración para realizar este proyecto surge del interés que siempre he tenido en poder combinar la mecatrónica y robótica específicamente con campos más variados tal como la agricultura o biología. La combinación de estas disciplinas siempre he sentido que permite facilitar el trabajo en ellas y crear un ámbito más seguro en el que se puedan desarrollar y estudiar al otorgar ciertas garantías que no pueden encontrarse con trabajo convencional. Este interés pudo dar frutos a través de este proyecto en el cual se diseñó un robot con el propósito de facilitar el trabajo en las fincas de café.

Quiero aprovechar a agradecer al Ing. Arturo Aguirre, propietario de la finca El Injerto, de quien surgió la idea para este proyecto y me otorgo la oportunidad para trabajar y hacerlo realidad. Sin su soporte e ideas este trabajo no podría haberse realizado.

También quiero agradecer a mi asesor, el cual brindo soporte en todas las fases de este proyecto y me ayudó a ver los problemas desde una perspectiva diferente para encontrarles solución.



<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>xi</b>
<b>Resumen</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Alcance</b>	<b>11</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>13</b>
6.1. Cuerpo general del robot . . . . .	13
6.1.1. Diseño . . . . .	13
6.1.2. Soldadura . . . . .	13
6.1.3. Impresión 3D . . . . .	15
6.2. Pala delantera . . . . .	15
6.3. Motores . . . . .	17
6.3.1. Cálculos . . . . .	17
6.3.2. Tipos de motor . . . . .	17
6.3.3. Actuadores lineales . . . . .	18
6.4. Diseño en 3D con Fusion 360 . . . . .	18

<b>7. Diseño del cuerpo del robot</b>	<b>21</b>
7.1. Cálculos y medidas . . . . .	21
7.2. Diseñado en 3D . . . . .	22
7.2.1. Programa de diseño . . . . .	22
<b>8. Primer prototipo</b>	<b>23</b>
8.1. Diseño . . . . .	23
8.2. Oportunidades de mejora . . . . .	25
<b>9. Segundo prototipo</b>	<b>27</b>
9.1. Carrocería . . . . .	28
9.2. Montaje de electrónica . . . . .	29
9.3. Pala delantera . . . . .	30
9.4. Rastrillos . . . . .	31
9.5. Soldadura . . . . .	32
<b>10. Listado de materiales</b>	<b>33</b>
<b>11. Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>12. Recomendaciones</b>	<b>37</b>
<b>13. Bibliografía</b>	<b>39</b>
<b>14. Anexos</b>	<b>41</b>
14.1. Planos de construcción . . . . .	41

---

## Lista de figuras

---

1.	Modelo de uno de los robots presentados como parte del evento Field Robot .	3
2.	Modelo de la parte inferior de un Roomba, mostrando sus llantas y aspiradora	4
3.	Modelo de una pala para remover nieve utilizada por máquinas barredoras . .	4
4.	Diagrama de equipo de soldadura TIG . . . . .	14
5.	Diagrama de equipo de soldadura MIG . . . . .	14
6.	Barras Blue Demon para soldadura . . . . .	14
7.	Diagrama de sistema de impresión FDM . . . . .	15
8.	Diagrama del modelo de una pala para nieve . . . . .	16
9.	Diagrama de un vehículo con una pala y el ángulo de la misma . . . . .	17
10.	Diagrama del control de un servomotor . . . . .	18
11.	Diagrama de un actuador de tornillo estandar . . . . .	18
12.	Primer prototipo trabajado . . . . .	23
13.	Pala del primer prototipo . . . . .	24
14.	Distribución de llantas de primer prototipo . . . . .	24
15.	Eje de llantas con tracción del primer prototipo . . . . .	25
16.	Diseño 3D del segundo prototipo . . . . .	27
17.	Modelo en 3D del eje y los motores . . . . .	28
18.	Análisis de esfuerzos en el eje . . . . .	28
19.	Distribución de ruedas en el segundo prototipo . . . . .	29
20.	Modelo 3D con el encoder . . . . .	29
21.	Modelo3D de la electrónica . . . . .	30
22.	Ejemplo de la construcción interna de un ala de avión . . . . .	30
23.	Modelo 3D de pala delantera . . . . .	30
24.	Análisis de estrés en la pala delantera . . . . .	31
25.	Modelo 3D de los actuadores . . . . .	31
26.	Barras de soldadura Blue Demon . . . . .	32
27.	Soldadura utilizando varillas Blue Demon . . . . .	32



---

Lista de cuadros

---

1. Listado de componentes utilizados en el robot . . . . . 34





Actualmente en la finca El Injerto se trabaja el secado de café de forma manual, por lo cual se propuso este proyecto con el objetivo de optimizarlo. Para esto se requirió una solución que pudiera seguir las mismas acciones mientras al mismo tiempo mantener la eficiencia y poseer un impacto ambiental mínimo. Debido a esto y a la sensibilidad del café ante su ambiente se optó no utilizar combustibles fósiles. Además de esto es necesario tomar cuidado de no dañar los granos por lo cual se vio necesario limitar o eliminar el contacto entre las llantas y los mismos.

Según estos requisitos este trabajo se enfocó en el diseño de un robot que asista en el secado de café al sol con un enfoque principal en los elementos mecánicos del robot tal como la estructura mecánica o los mecanismos de los rastrillos. Esto puede lograrse al mantener un movimiento constante del café con el objetivo de que esté expuesto al sol de forma homogénea y no se mantenga húmedo. Para realizar esta tarea se tomó inspiración de robots ya existentes tal como las aspiradoras Roomba o los vehículos utilizados para remover nieve y sobre estos se agrego los mecanismos necesarios para mover el café.

Para lograr refinar aspectos del robot se trabajo con prototipos en los cuales se realizaron mejoras gradualmente en distintos aspectos. Algunos de estos aspectos fueron la fluidez de movimiento del robot o el diseño de la pala con el objetivo de evitar esfuerzos adicionales. Entre los aspectos modificados durante las distintas fases de diseño están los materiales, la distribución de llantas y los rastrillos y pala delantera. Para la distribución de las llantas se utilizó como base la Roomba mientras que se mantuvo el diseño general simple y fácil de replicar con el objetivo de facilitar en un futuro la manufactura a escala.

Finalmente se llegó a la resolución que es importante tomar en cuenta los materiales a utilizarse debido a su influencia sobre el peso y por consiguiente el movimiento del robot. Adicionalmente se notó la importancia de considerar complicaciones tales como interferencia en la pala delantera debido a granos de café o cambios en dirección debido a diferencias en velocidad en las llantas.



Currently in the *Finca El Injerto* the drying of coffee beans is done manually, which is part of the reasons why this project was proposed, as a way to optimize this task. In order to achieve this it was necessary to replicate the same actions currently done while also maintaining efficiency and keep environmental impact to a minimum. This reason coupled with coffee's sensibility to smells it was decided to avoid using fossil fuels. It is also necessary to take care not to damage the beans which is why it was deemed necessary to limit or eliminate all contact between them and the wheels.

This is an abstract of the work presented in which the objective was the design of a robot to assist with the drying of coffee beans in the sun, with a specific focus on the mechanical aspect of the robot while taking the mentioned requirements into consideration. The task presented to the robot is to give continuous movement to the coffee beans by means of a rake like appendage so that it does not dry on one side only. To achieve these results we took inspiration from real life examples that follow similar movements like the Roomba vacuum cleaner or snow plow machines.

In order to refine aspects of the design the work was advanced in different prototypes in which changes were applied as to improve the work flow of the robot. Among the aspects modified between the different prototypes were the materials of the structure, the wheel distribution, as well as the rake and frontal shovel design. The focus of these changes were to reduce the weight of the overall structure and to avoid possible interference during its movement.

The conclusion reached was concerning the importance of taking into consideration the materials to be used due to their weight and the influence this has over its movement. In addition to this it is important to consider the importance of possible complications due to smaller coffee beans going under the frontal shovel or unplanned changes in direction due to differences in the wheel velocities.



El objetivo de este trabajo fue crear un diseño de robot para asistir en el secado de café al sol al proveer un movimiento constante del mismo. El planteamiento del trabajo fue en el aspecto mecánico del robot, analizando aspectos de la estructura general y particularidades de los mecanismos esenciales para su funcionamiento. Para poder lograr esto se plantearon objetivos específicos que permitieran mantener un mejor control del progreso y avances del trabajo.

Para realizar el diseño del robot fue necesario hacer de manera individual cada componente que lo conforma, como la pala, rastrillos u estructura. Esto también incluye los sensores necesarios para la localización del robot y los motores o baterías necesarias para una larga vida de trabajo. Utilizando esta lista se realizó los análisis necesarios para determinar los aspectos esenciales del robot y así diseñar al rededor de estos los detalles de menor importancia. Estos detalles facilitaron el uso del programa de diseño 3D *Fusion 360* para realizar un modelo del robot que permita observar la interacción entre piezas y posibles cambios que se requiera realizar.

El trabajo que se presenta en este documento está dividido según las distintas fases que se siguieron durante el proceso de diseño. Esto comienza con el trabajo investigativo realizado sobre instancias similares a este robot y como se puede buscar inspiración de los mismos. Luego de esto se da la importancia de este proyecto en su entorno y los objetivos que se buscaron lograr con el mismo y el alcance que se dio para poder definirlo adecuadamente. Seguido de esto el documento habla sobre las características elegidas para el robot y las particularidades que llevaron a estas decisiones al igual que sobre el programa de diseño y el proceso iterativo que nos llevó a realizar varios prototipos para así detectar áreas de mejora. Finalmente se listan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegaron durante y después del proceso de este trabajo.



El concepto del uso de maquinaria automatizada en el campo de la agricultura no es un concepto nuevo en varias partes del mundo. El objetivo de la innovación y de mejorar la eficiencia del trabajo es uno de los motores mas fuertes de este movimiento. Esto se ve ejemplificado en la competencia de Field Robot la cual se realiza cada año en Alemania con el objetivo de que participen los estudiantes de varias universidades de Europa. Estas universidades diseñan un robot con el objetivo de que este navegue en un campo de agricultura y sea capaz de realizar tareas específicas . Los robots que se presentan en estas competencias poseen varios puntos en común con el diseñado en ese documento, tanto en la estructura como sus sistemas electrónicos y de potencia. La mayoría de estos robots poseen entre 3 y 4 ruedas o orugas con el objetivo de movilizarse de mejor manera en el terreno del campo, adicionalmente estos no están diseñados para tiempos de uso largos, por lo cual poseen baterías de tamaño menor a la utilizada en este prototipo. Según estas similitudes se trabajo este proyecto tomando en consideración las descienes de diseño realizadas por los equipos participantes en estas competencias.[1]

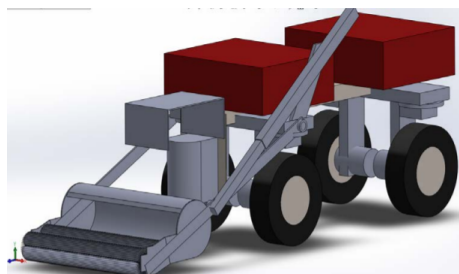


Figura 1: Modelo de uno de los robots presentados como parte del evento Field Robot

Además de esto se investigó el diseño de las aspiradoras Roomba para tomar como referencia su sistema de movimiento y de sensores para implementarlo. El Roomba es un aspiradora automatizada que funciona con tres llantas, dos con tracción y una llanta libre que provee estabilidad y balance al sistema. Utilizando este sistema es posible simplificar el método de cruzado del robot al solo necesitar dos motores y manteniendo el centro de

gravedad del sistema para que el mismo gire sobre su eje. Adicionalmente se puede utilizar el sistema de localización por láser para limitar los espacios en los que se puede movilizar el robot al crear una pared utilizando estos láser.

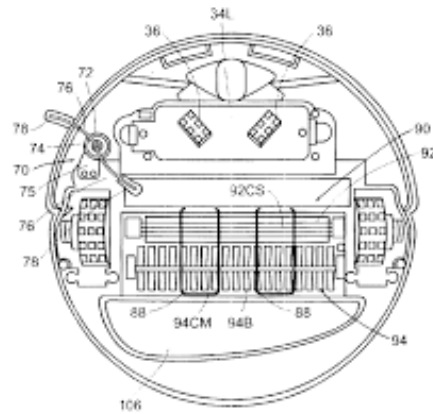


FIG. 2A

Figura 2: Modelo de la parte inferior de un Roomba, mostrando sus llantas y aspiradora

A partir de esto se obtuvo una estructura base con la que trabajar y a la cual agregarle componentes para tareas más específicas. Para la pala delantera del robot se utilizó como referencia los mecanismos similares que se emplean en los trenes durante las épocas nevadas con el propósito de remover la nieve de las vías del tren. Se investigó las investigaciones realizadas previamente[2] sobre el ángulo óptimo para los distintos grosores de material que se necesita mover utilizando este tipo de herramientas. Esto se debe a que además de utilizarse para la nieve también se utiliza para mover objetos como grava o arena y otros materiales con varias formas y tamaños.

Para facilitar la manufactura de la pala delantera se investigó e implementó en el diseño las características de un ala de avión. Estas están compuestas de un esqueleto el cual tiene el propósito de brindar rigidez al elemento mientras que se realiza un recubrimiento con materiales livianos para darle la forma final a el ala.

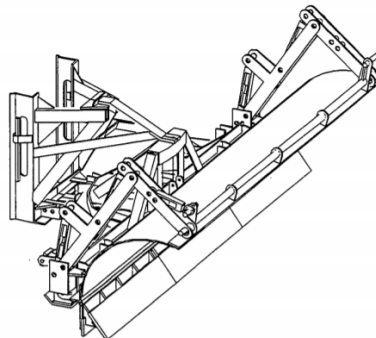


Figura 3: Modelo de una pala para remover nieve utilizada por máquinas barredoras

De igual manera se buscó actuadores lineales que permitieran el movimiento deseado de los rastrillos laterales, evitando que al dar la vuelta se arruinen las líneas de café realizadas.



Se optó por utilizar un sistema similar al utilizado en las impresoras 3D, donde se tiene un tornillo como eje y el movimiento vertical es realizado por una tuerca que se desplaza al girar el eje.



Este proyecto fue ideado con el propósito de entregar a la finca El Injerto un producto finalizado, el cual es de fácil mantenimiento y sea fácilmente replicado con los recursos de la finca. Esto permitirá reducir el peso sobre los trabajadores en las fincas y dar espacio para mejorar la eficiencia en otros aspectos del trabajo en la finca, al reducir el tiempo y mano de obra a invertirse en este área de la producción del café y así concentrar una mayor cantidad de recursos en otros segmentos que los necesiten.

Esto adicionalmente tiene la posibilidad de tener un amplio impacto sobre el sector económico y ambiental de Guatemala, siendo el café una parte de gran importancia en su economía. Mientras que las fincas de tamaños pequeños utilizan el mismo método de secado al sol que emplea la finca El Injerto, la mayoría de fincas como estas con una mayor tamaño y producción utilizan secadores rotativos, los cuales consumen gas o gasolina para su funcionamiento. Al normalizar el uso de este sistema utilizando trabajo automatizado en conjunto con el secado al sol tradicional se puede aumentar de igual manera la eficiencia en fincas más pequeñas mientras que al mismo tiempo se podría mantener la eficacia en las fincas de mayor tamaño mientras que al mismo tiempo se aumenta la sostenibilidad de la finca según que tan amigable son sus prácticas con el ambiente.



### 4.1. Objetivo general

Diseñar un robot móvil que asista en el proceso de secado de café.

### 4.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema de sensores en el diseño que le permitan al robot moverse de forma autónoma en el área de secado de café.
- Implementar en el diseño los sistemas necesarios de control para crear un modelo funcional con el cual la finca pueda trabajar con un mínimo de instructivos.
- Utilizar software de diseño asistido por computadora para el diseño completo del robot móvil de simple manufactura, ensamblaje y mantenimiento.
- Realizar simulaciones y análisis para verificar el correcto funcionamiento y solidez estructural del robot.
- Realizar videos, manuales y planos para la replicación del robot.
- Realizar un listado de componentes y pieza necesarias para el robot.



Este proyecto tiene como objetivo el diseño y manufactura de un prototipo de robot que asista en el secado de café en la finca El Injerto.

El alcance de este trabajo propone la investigación de los elementos necesarios para el diseño de un prototipo funcional que cumpla con las necesidades de la finca. Esto se compone de la carrocería del robot, incluyendo la estructura general y mecanismos de movimiento, la pala delantera para el desplazamiento de café y los rastrillos del mismo propósito.

El diseño CAD para esto incluiría todos los elementos mencionados anteriormente para poder completar el modelo. Este proceso abarcaría también mas de una iteración para así determinar las posibles mejoras y las soluciones mas aptas a las necesidades mencionadas.

La manufactura se encuentra actualmente limitada debido a la presente pandemia de COVID-19, por lo cual se trabaja con recursos limitados. Debido a esto se pueden realizar tareas como soldadura de elementos pero existen dificultades en tareas como la impresión 3D o pruebas de campo. En el caso de estas limitantes se dejara documentada la infraestructura para realizar estos pasos a futuro.

En este proyecto se optó por limitarse a la fase de desarrollo debido a que una producción en masa requeriría más tiempo e inversiones. Se sintió que esto requeriría un proyecto a parte con objetivos distintos y estrategias diferentes a como abordarlo.





## 6.1. Cuerpo general del robot

### 6.1.1. Diseño

Para el cuerpo general del robot se optó por implementar un modelo simple que permitiera acceso fácil a los componentes en su interior y que permitiera al mismo una buena distribución de su peso para así facilitar el movimiento y eficacia. En el caso de las llantas se optó por un sistema modelado del Roomba, una aspiradora automatizada, el cual posee dos llantas con tracción que definen el movimiento y dirección y una llanta libre en su segmento posterior que sigue el movimiento de las otras dos llantas y tiene como propósito brindar estabilidad al sistema y proporcionar una mejor distribución de su peso.

### 6.1.2. Soldadura

Existen distintas técnicas para soldar dos piezas de metal juntas, en particular para este caso es el aluminio el cual junto a metales similares poseen opciones adicionales para realizar esta tarea. Los dos métodos mas comunes de soldadura son TIG y MIG mientras que el método utilizado en este trabajo utiliza un soplete junto con varillas de metal suave.

En el caso de la soldadura TIG, la cual se llama así por sus siglas en inglés (Tungsten Inert Gas)[1], se utiliza un electrodo permanente de tungsteno el cual se calienta eléctricamente y utiliza un gas protector para evitar el contacto entre el arco eléctrico y sus alrededores. Mientras que este tipo resulta en un cordón de soldadura mas flexible y resistente a la corrosión también requiere de equipo especializado.

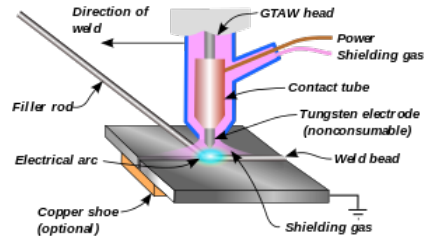


Figura 4: Diagrama de equipo de soldadura TIG

De manera similar la soldadura MIG se llama así por sus siglas en inglés (Metal Inert Gas) que utiliza un gas protector como argón y un arco eléctrico por medio de un electrodo que en este caso es reemplazable. Este tipo también presenta resultado de alta calidad, pero posee el requisito del equipo especializado necesario para realizarse. **Soldadura MIG**

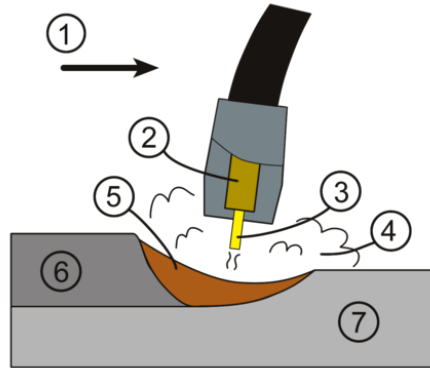


Figura 5: Diagrama de equipo de soldadura MIG

Como se mencionó anteriormente la soldadura utilizada en este proyecto fue mediante un soplete un varillas de metal. En el caso del soplete este puede ser de gases como Butano o Propano y en el caso de las varillas estas son a base de un metal como broce o zinc. En este caso se utilizó varillas Blue Demon de aluminio suave las cuales requieren de un desgastado de la superficies de la pieza a trabajar y que esta misma se caliente. Una vez se ha calentado la pieza a soldarse se aplica la varilla para que esta se derrite y forme el hilo. Las ventajas de este método de soldadura es que no requiere de equipo especializado y otorga un resultado resistente con buen acabado

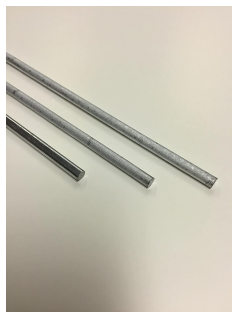


Figura 6: Barras Blue Demon para soldadura

### 6.1.3. Impresión 3D

La impresión 3D, también conocida como manufactura por adición, es una serie de procesos que se basan en la producción mediante la adición de material en capas que corresponden a distintas secciones transversales de un modelo tridimensional.[2] La técnica de impresión 3D más comúnmente utilizada es la FDM o Modelado por Deposición Fundida se basa en tres elementos principales que son una bobina o rollo de filamento, una placa de impresión y la cabeza de extrusión del material. Este método jala el material de la bobina de filamento hacia el extrusor donde es calentado y depositado sobre la cama formando así las capas de la figura tridimensional.[3] Los materiales principalmente utilizados son el plástico y el metal los cuales se dividen en más clasificaciones respectivamente. En el caso del plástico, que es el material utilizado en este proyecto, algunos de las opciones son PLA, ABS, PET, PC y otros.

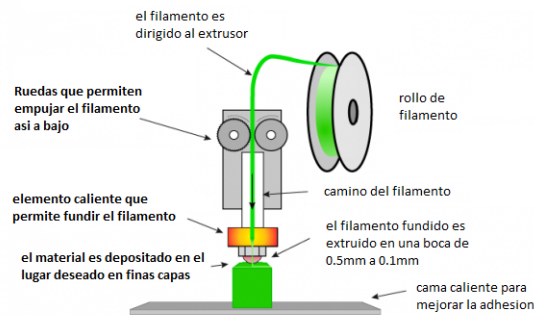


Figura 7: Diagrama de sistema de impresión FDM

Los plásticos más comúnmente utilizados son el PLA y el ABS, los cuales tienen sus propias ventajas y métodos de trabajo. En el caso del PLA, conocido como Ácido Poliláctico, este está manufacturado de materiales renovables tal como almidón de maíz por lo cual este posee la ventaja de ser biodegradable. Además de esto es uno de los más simples de imprimir debido a su temperatura de trabajo más baja con la desventaja que reduce su tamaño al enfriarse. Otra de sus desventajas es la dificultad de manipularlo por su alta velocidad de enfriamiento lo cual lo hace más rígido.[4]

Por otro lado el ABS no es biodegradable pero posee la ventaja de tener una mayor resistencia a los golpes y flexibilidad. El material para este plástico es polibutadieno y se utiliza en carrocería de automóviles, electrodomésticos y estuches para teléfonos móviles. Este material posee la ventaja de resistir una amplia gama de temperaturas entre -20 y 80 grados centígrados. A pesar de esto es más complejo su manejo al requerir de una superficie caliente al momento de impresión ya que se contrae en contacto con el aire. [4]

## 6.2. Pala delantera

La sección de pala delantera utilizada en el robot para mover el café frente a él obtuvo su inspiración de las máquinas utilizadas para remover la nieve de las vías públicas. A través

de experimentación documentada se encontró que el ángulo de contacto de la pala delantera depende principalmente de el tamaño de los granos del material a moverse al igual que la forma en que este se comporta en agrupaciones grandes.

La nieve se puede clasificar según el grosor de sus granos en conjunto con la adhesión que existe entre los mismos, esto se debe a que dependiendo de estas condiciones puede comportarse como una agrupación de sólidos o como un semi líquidos al entrar en contacto con la pala. Al tener una mejor comprensión de este comportamiento es posible idear un ángulo de contacto para la pala que permita minimizar las perdidas en velocidad y potencia debido a la compresión o resistencia del material desplazado. [5]

Resultados experimentales por otros estudios han encontrado que utilizar un material con un coeficiente de fricción bajo influye de manera significativa en la potencia perdida durante la acción de barrido. [5] Esto en conjunto con la curvatura de la pala son los principales aspectos de importancia en el desarrollo de la misma. [5] Estos estudios se realizaron con una combinación de modelos teóricos previos junto con simulaciones para analizar el comportamiento de las partículas de nieve a lo largo del modelo propuesto de pala. Por medio de esto se encontró un ángulo ideal de 70 a 80 grados con respecto al suelo el cual depende mayormente de las características físicas del material, disminuyendo este con forme aumenta el grosor de las partículas.

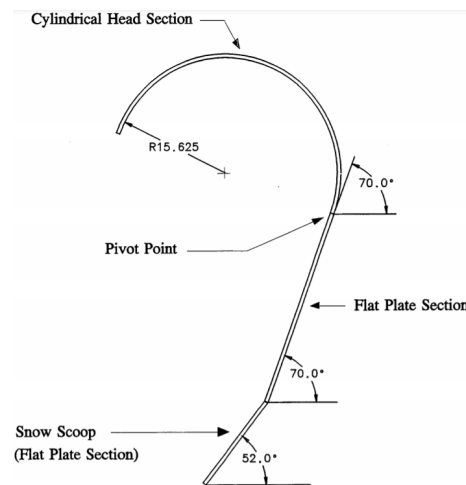


Figura 8: Diagrama del modelo de una pala para nieve

Adicionalmente también se toca el tema del ángulo de la pala con respecto a la carrocería, el cual influye en el esfuerzo requerido para mover el material debido a la compresión del mismo mencionada anteriormente. [5] Este ángulo requiere de un balance adecuado debido a que se debe considerar tanto los esfuerzos adicionales frontales y laterales que pueden causar pérdida en velocidad o desgastes en el mecanismo. Debido a estos puntos se ah encontrado que un ángulo de 75 grados es el preferido para así minimizar los efectos de ambos puntos.

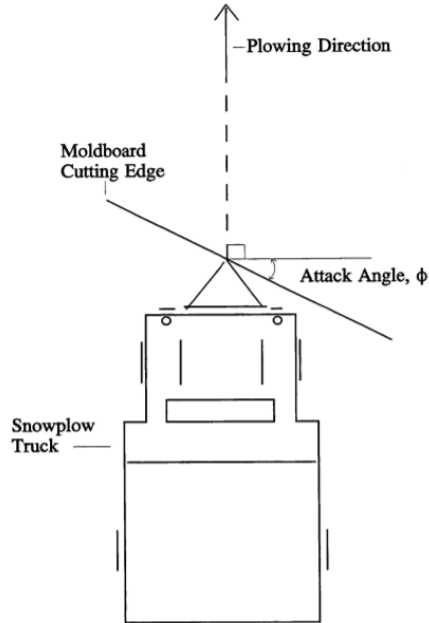


Figura 9: Diagrama de un vehículo con una pala y el ángulo de la misma

## 6.3. Motores

### 6.3.1. Cálculos

Para los motores se tuvo que obtener primero el peso de la estructura general para así poder calcular el torque que se necesita para mover las llantas.

$$T = F * r$$

Donde F es la fuerza que se está realizando y r es la distancia desde el centro de masa hacia el punto de aplicación del torque.

Utilizando este torque es posible limitar de mejor manera la selección del motor a utilizarse. Esto se debe a que cada tipo de motor posee sus propias características y torques de trabajo al igual que la resistencia que presentan ante esfuerzos mayores.

### 6.3.2. Tipos de motor

#### Motores Stepper

El motor Stepper mejor conocido como motor Paso a Paso funciona a base de impulsos eléctricos que a través de los componentes electromecánicos en su interior se convierten en desplazamientos angulares. Estas características le permiten variar sus grados de giros dependiendo de la entrada con la que se le alimente el sistema de control. [6]

## Servo motores

Los servomotres son un tipo de motor que funciona a base de un encoder, el cual convierte el giro mecánico en pulsos digitales los cuales son interpretados por un controlador de movimiento.[7] Este componente se utiliza en conjunto con drivers que manejan el movimiento mecánico para controlar el movimiento, velocidad y torque del motor.

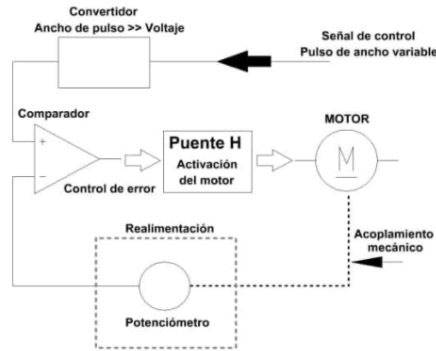


Figura 10: Diagrama del control de un servomotor

### 6.3.3. Actuadores lineales

Los actuadores lineales son actuadores como lo solo los motores con la diferencia de que estos crean un movimiento a lo largo de una línea recta. Estos puede dividirse en dos clasificaciones grandes, los de tornillo y los de torno donde ambos funcionan al convertir un movimiento rotativo en lineal. Los actuadores de tornillo, tal como su nombre lo indica, están compuestos por una tuerca la cual gira y genera el movimiento lineal del eje del tornillo.[8]

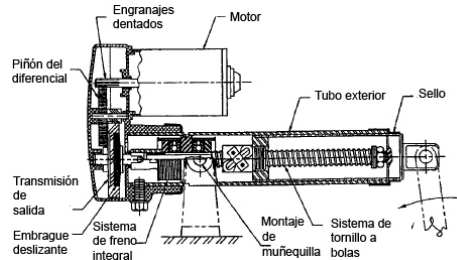


Figura 11: Diagrama de un actuador de tornillo estandar

## 6.4. Diseño en 3D con Fusion 360

Fusion 360 es una herramienta de modelado CAD de Autodesk. Este programa se enfoca en el uso de comandos estándar de modelado implementando una plataforma de manejo de versión en línea, lo cual permite mantener los archivos en la nube y consumir menos recursos en el ordenador. Estando este en distintas plataformas lo hace más accesible sin requerir de hardware especializado.

Al manejar una amplia gama de estilos de modelado y formatos de exportación los usos que se puede derivar son de gran variedad. Los archivos pueden exportarse en formato STL, OBJ o como mallas y puede realizarse la animación del movimiento o los análisis de esfuerzo requeridos para validar un modelo.[9]





## 7.1. Cálculos y medidas

En el diseño de un robot móvil es importante conocer las dimensiones y peso debido a que varios parámetros del sistema son dependientes de esto. Para realizar esto se investigó sobre los tamaños de componentes esenciales como los motores y baterías para poder estimar las dimensiones del robot y realizar cálculos más exactos. Utilizando estos datos se realizó los cálculos de peso y torque del robot. Estos datos se compararon con los de las baterías y motores para así garantizar un funcionamiento fluido. Estos datos también permiten confirmar la cantidad de horas continuas que puede trabajar al compararlo con la corriente que se utiliza en el proceso.

$$T = F * r$$

Estos cálculos de torque se llevaron a cabo utilizando la ecuación simple que toma en consideración la fuerza y la distancia entre los puntos a evaluar. Para esto se realizó esta operación dos veces, la tiene el propósito de reflejar el peso en centroide hacia el extremo del eje calculando así el esfuerzo requerido para girar. La segunda instancia de esta operación utiliza el diámetro de la rueda junto con el esfuerzo calculado anteriormente para así obtener el torque que experimentan los motores debido al peso de la estructura.

Para la forma general del robot se tomó como referencia los robots de la competencia *Field Robot* mencionada anteriormente en conjunto con el sistema de llantas de las aspiradoras *Roomba* lo cual permite hacer un sistema de movimiento más simplificado y de mejor eficiencia que al tener un set de cuatro ruedas. Este sistema está compuesto por tres ruedas, una trasera que no posee tracción y dos delanteras que son las que se acoplan a los motores y están alineadas con el centro de masa del robot. Debido a esto en los cálculos de torque

requerido para girar solo es necesario tomar en cuenta estas dos ruedas como otro cálculo de torsión adicional.

## 7.2. Diseñado en 3D

El diseñado en 3D de un modelo o prototipo es una herramienta esencial para la creación con el objetivo de visualizar de mejor manera los objetos. Esto se debe a que nos permite observar los modelos creados desde distintos ángulos y al mismo tiempo analizar cómo estos interactúan con otras piezas como parte de un mismo ensamble.

### 7.2.1. Programa de diseño

El programa utilizado para el modelado en 3D fue *Fusion 360*, el cual es un programa de modelado CAD en línea que es parte de la plataforma de *Autodesk*. A través de esta plataforma se diseñaron elementos de los prototipos con dos diferentes objetivos, visualización y manufactura. El aspecto de la visualización tiene como objetivo poder “renderizar” el modelo del robot y ver las interacciones entre las piezas y visualizar las medidas exactas de las mismas. En contraste la manufactura se refiere a la fabricación, por medio de la impresión 3D de las piezas modeladas en el programa. Para la manufactura de estas piezas modeladas es necesario tomar en cuenta el tamaño de la impresora 3D a utilizarse al igual que la superficie sobre la cual se realizará, ya que la estabilidad garantiza una mejor impresión.

---

## Primer prototipo

---

El primer prototipo dio la oportunidad de probar las ideas generales del modelo ideado, tomando como inspiración los modelos de robot de la competencia *Field Robot*. En conjunto con esto se utilizó las ideas generales para el sistema para dar vueltas al igual que los rastrillos y la pala delantera.

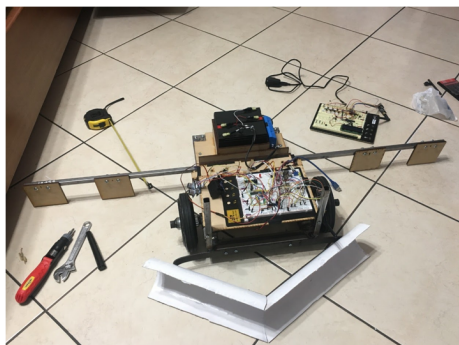


Figura 12: Primer prototipo trabajado

### 8.1. Diseño

El diseño del primer prototipo, principalmente la carrocería, se basó en los diseños de la *Field Robot Competition* donde varios grupos realizan robots para el sector de agricultura. El cuerpo del robot tiene un forma rectangular abierta con la electrónica posicionada sobre los motores y las baterías en la sección trasera del robot. Para este prototipo el material utilizado fue acero, el cual se utilizó en los ejes principales de la estructura al igual que en los ejes que conectan las llantas a los motores ya que este es un material con buena resistencia

a esfuerzos. En conjunto con esto también se uso planchas de MDF el cual es un material liviano para las placas o paredes del modelo.

En este prototipo se hizo uso de una protoboard para la electrónica debido a que varios aspectos de la electrónica todavía se encontraban en su fase de pruebas. Esto permitió un fácil acceso a los componentes para realizar cambios. Además de esto su posición se encuentra sobre las llantas para así poder minimizar los esfuerzos sobre los motores.

La pala delantera se realizó según los estudios sobre el barrido de nieve que se mencionó anteriormente, donde se tomó el material a ser movido como partículas de tamaño similar al café para así aprovechar los resultados de dicho estudio. Esta se fabricó utilizando una tubería de PVC la cual fue seccionada a la mitad y se cortó para dar la forma necesaria. En el caso de este modelos se utilizó el ángulo de ataque de 75 grados con respecto al carro mientras que el ángulo con respecto al piso es dado por la curvatura de la tubería.

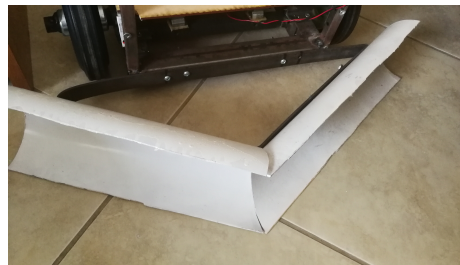


Figura 13: Pala del primer prototipo

Los rastrillos, de igual manera que la estructura general, se elaboraron utilizando tubería cuadrada de acero en conjunto con planchas de MDF. Estos se mantuvieron fijos para proveer estabilidad al entrar en contacto con el café y así realizar surcos uniformes.

La distribución de ruedas del modelo esta basada en los prototipos de la Field Robot Competition donde se poseen 4 ruedas, una en cada esquina de la estructura. De estas cuatro ruedas se optó por un sistema en el cual las ruedas delanteras sean las que poseen tracción, mientras que las traseras pueden girar libremente se tal forma de que estas sigan a las principales en un sistema similar al de los automóviles.



Figura 14: Distribución de llantas de primer prototipo



Figura 15: Eje de llantas con tracción del primer prototipo

## 8.2. Oportunidades de mejora

Durante el proceso de manufactura y prueba de este prototipo se encontraron varios aspectos del diseño abiertos a mejoras o cambios. Según estos aspectos se determinaron las cualidades que deben de tomarse en cuenta para el diseño de futuros prototipos.

El primero de estos cambios fue el material utilizado en la carrocería del robot. A través de las pruebas de movimiento realizadas se encontró que el acero es un material muy pesado, causando esfuerzos innecesarios en los motores. Debido a esto se optó por cambiar el material a aluminio.

En conjunto con el material se optó por hacer cambios a los motores para garantizar un torque suficiente para generar movimiento. Debido a esto se eligió motores de ventana utilizados en automóviles, con un torque de entre 2.9 Kg hasta 10Kg. Además de esto se encontró un movimiento desigual entre las llantas, causando desvío de la trayectoria que se buscaba.

Se optó hacer un rediseño de la pala delantera utilizada ya que la forma de manufactura se encontró poco confiable en caso de una fabricación a mayor escala.

Finalmente se decidió cambiar la conexión de los rastrillos ya que al dar vuelta el robot estos podían mover el café fuera del área de trabajo.



---

### Segundo prototipo

---

En el segundo prototipo se tomó un enfoque en realizar las posibles mejoras encontradas en el modelo anterior con el objetivo de mejorar su eficiencia.

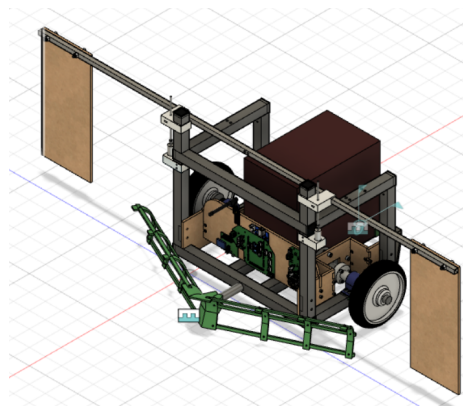


Figura 16: Diseño 3D del segundo prototipo

El siguiente cambio que se realizó fue a la pala delantera, con el mismo objetivo de reducir los esfuerzos por peso y al mismo tiempo con el propósito de facilitar la manufactura del mismo. Para esto se tomó el diseño de la pala original y se trabajó de nuevo utilizando como referencia el modelo del ala de un avión, la cual está compuesta de un esqueleto rígido con un recubrimiento de un material más liviano. Además de esto se investigó sobre el movimiento de materiales granulares como sería el café con el objetivo de poder optimizar el ángulo de la pala y así minimizar los esfuerzos adicionales en ese punto. Para realizar esto se basó en las máquinas barredoras de nieve y en los acoples para esta misma función que se utiliza en los trenes. Al investigar estos mecanismos se encontraron estudios[5] que estudian el ángulo ideal para esta tarea y como este cambia con el grosor de grano del material a desplazarse, siendo el grava el que se utilizó debido a la cercanía en tamaño al café.

El último cambio en realizarse al modelo fue a los rastrillos laterales del robot los cuales estaban fijos en el primer prototipo. Para la segunda iteración se optó por utilizar actuadores lineales para poder modificar la elevación de estos de tal manera que, al momento de girar, no se interrumpen las líneas formadas de café y se esparzan los granos más allá del recuadro de trabajo. Esto se logró utilizando motores en conjunto con partes impresas.

## 9.1. Carrocería

Como fue mencionado, el cambio principal fue el material general de la estructura debido a las complicaciones por el peso del acero. Para rectificar esto se reemplazó por tuberías cuadradas similares hechas de aluminio el cual es metal menos pesado, con una densidad de  $2.7g/cm^3$  en contraste a los 7.8 del acero.

Utilizando estos datos y utilizando las ecuaciones de torque se pudo determinar que el torque final del modelo es de 2 Nm, según lo cual se puede tomar una decisión sobre los motores. Para este prototipo se eligió motores comúnmente utilizados en las ventanas de los vehículos con un torque de trabajo de 2.9 Nm el cual puede llegar hasta 10 Nm al forzarse.

$$T = F * r$$

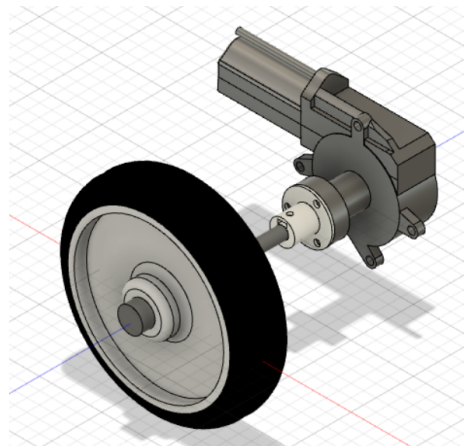


Figura 17: Modelo en 3D del eje y los motores

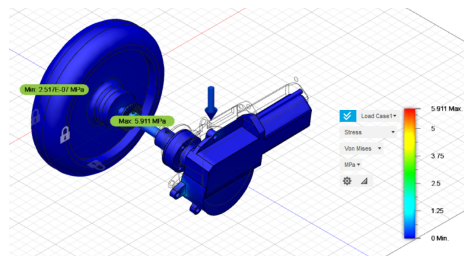


Figura 18: Análisis de esfuerzos en el eje

Al realizar el análisis de estrés sobre el eje propuesto se pudo comprobar que este resiste los esfuerzos presentes en el mismo.



El siguiente cambio realizado en la carrocería fue a la distribución de llantas, donde se redujo de cuatro a tres de estas. Durante las pruebas del primer prototipo se encontraron complicaciones con las ruedas posteriores ya que estas no siempre giraban en sincronía. Esto fue resuelto al eliminar una de las ruedas libres y desplazando la restante hacia el centro de la barra trasera. Esto permite que el robot se mantenga estable solamente disminuyendo el área de su centro de gravedad a un triángulo entre las tres ruedas.

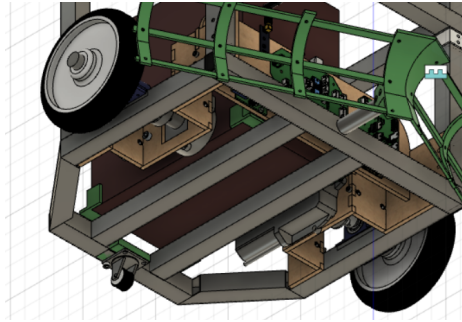


Figura 19: Distribución de ruedas en el segundo prototipo

Debido a las complicaciones que se presentaron con que el robot mantuviera su trayectoria también se le agregaron sensores para realimentación y control. Estos se componen de *encoders*, los cuales registran la velocidad de las llantas para detectar diferencias entre ellas.

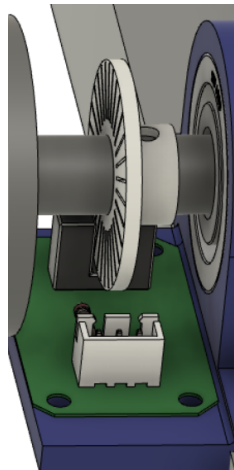


Figura 20: Modelo 3D con el encoder

## 9.2. Montaje de electrónica

Debido a los cambios que se realizaron en la distribución de peso y elementos fue necesario reevaluar la posición de los elementos de electrónica. Debido a la necesidad de mantener el centro de gravedad del modelo entre las ruedas se dio prioridad a la batería por su gran tamaño. En base a esto se optó por colocar la electrónica en una plancha de MDF vertical lo cual permite aprovechar el espacio pequeño y su peso ligero.

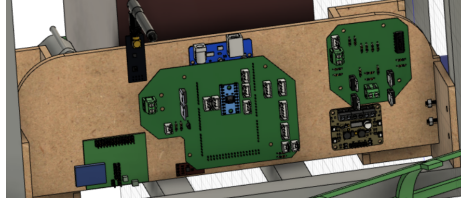


Figura 21: Modelo3D de la electrónica

### 9.3. Pala delantera

El diseño de la pala delantera se modifico completamente para poder garantizar un método de manufactura mas eficiente y confiable. Esto se logro al optar por un diseño similar al utilizado en las alas de un avión. El método utilizado en este tipo de estructuras se denomina semimonocasco el cual utiliza un recubrimiento delgado y ligero pero mantiene su forma al utilizar “costillas” las cuales proveen soporte. Estos elementos se utilizaron en el rediseño de la pala, utilizando una serie de costillas para dar la forma y soporte de la pala las cuales utilizan un recubrimiento para dar una forma final y que esta pueda cumplir su función.

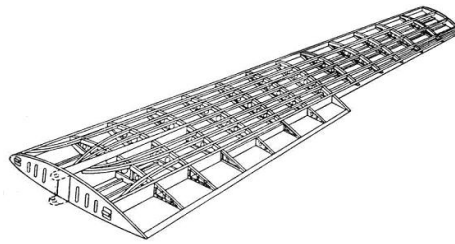


Figura 22: Ejemplo de la construcción interna de un ala de avión

Además de estos cambios también se incluyó en el diseño los mecanismos necesarios para implementar ángulos de 75 grados con respecto al suelo y a la carrocería. Estos ángulos, como fue visto en los estudios mencionados, permiten minimizar esfuerzos adicionales al desplazar el café. Su uso facilita el movimiento del robot al reducir resistencia del café entrar en contacto con el modelo.

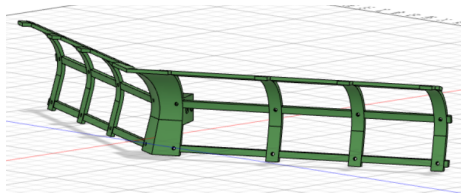


Figura 23: Modelo 3D de pala delantera

Al realizar el análisis de estrés presente en la pala durante su funcionamiento se encontró que mientras no es crítico, la base de las varillas horizontales están sujetas a mayores esfuerzos. A pesar de esto el análisis indica que estos son fuerzas que el material sí puede soportar.

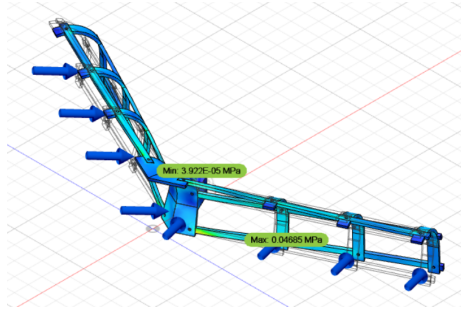


Figura 24: Análisis de estrés en la pala delantera

## 9.4. Rastrillos

Mientras que el diseño de los rastrillos permaneció con la misma forma, se agregó a estos un actuador lineal. Este mecanismo permite levantar los rastrillos al momento de dar la vuelta evitando así que se mueva los granos fuera de su área de trabajo. Estos actuadores se realizaron según el modelo del actuador de tornillo, donde se provee giro a una tuerca lo cual genera un movimiento lineal en el eje roscado. Las partes para este mecanismo se plantearon para realizarse utilizando impresión 3D para así mantener un peso ligero.

El movimiento para este componentes está planteado para funcionar utilizando un pequeño motor DC, el cual solamente requiere de la señal eléctrica para accionarse.

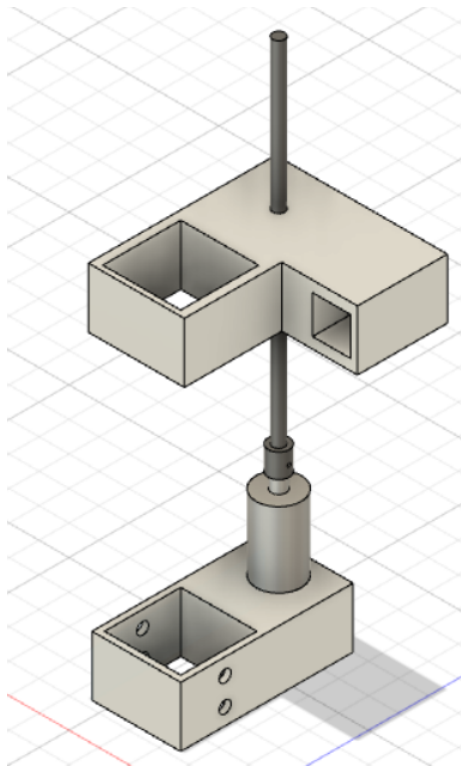


Figura 25: Modelo 3D de los actuadores

## 9.5. Soldadura

Debido a las limitaciones que se presentaron ante la pandemia del COVID-19 se tuvo que cambiar el método de soldadura que se utilizó. Esto se debió a que no se tuvo acceso al equipo requerido para soldadura como TIG o MIG, optando en ese caso por soldadura por soplete. Para este proceso se utilizó un soplete de gas propano en conjunto con varillas de soldadura Blue Demon las cuales forman el cordón.

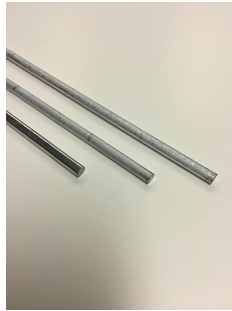


Figura 26: Barras de soldadura Blue Demon

El proceso para utilizar estas herramientas consiste en emplear un cepillo de cerdas de acero sobre la superficie para desgastar la capa de óxido existente. Una vez completado esto se calienta las piezas de aluminio a utilizar en la posición en que se quieren soldar estas. Tras calentarla durante algunos minutos esta debería de llegar a la temperatura necesaria es se debe remover la llama del soplete y aplicar la soldadura. Esto solamente requiere que la varilla se roce sobre la superficie caliente y esta naturalmente se derretirá y formará la línea de soldadura.



Figura 27: Soldadura utilizando varillas Blue Demon

## CAPÍTULO 10

---

Listado de materiales

---

Cuadro 1: Listado de componentes utilizados en el robot

Componente	Cantidad	Precio total
Motor de para brisas 12V	2	300.3
Drivers motor	1	346.15
Conector potencia	3	40.43
Bateria	1	940
Bornes	2	60
Cable potencia	4	15.8
Terminal pala macho 14 - 16AWG	26	26
Regulador LM11175-3.3V	5	50
Pin doble fial header macho	1	7
Conector Dupont + Pines	1	115.5
Conector Dupont para cable	1	92.4
Cable Dupont	1	52.82
Tubo 18AWG termoencogible	1	5
Tubo 14AWG termoencogible	1	5
IMU 9 GDL	1	122.8
DWM1001-DEV	5	1501.5
Arduino DUE	1	252
Fotointerruptor Sharp A52	4	32
Porta batería	5	65
TXS0108E	2	48
Micro-Switch palanca	2	20
Tubería aluminio	1	110
Varillas de soldar	1	160.69
Panel solar	2	683.6
Solar Charger Controller	1	100
Motor Dc	2	20
Atmega328P	4	200
Capacitores	6	6
Resistencias	15	7.5
Terminales de tornillo	13	32.5
NRF24L01 & módulo	2	138.46
KA228	6	92.4
Push Buttons	9	9
FTDI	1	49
Rueda 160mm	2	304
Lanta loca	1	45
Tornillos	80	293
Tuercas	80	950

- La implementación de los encoders en las llantas permite al robot corregir su trayectoria de forma automática, limitando así la interferencia externa necesaria.
- Utilizando la herramienta *Fusion 360* se dejó documentado todos los planos y modelos tridimensionales del prototipo y se pudo ensamblarlo en el mismo programa para demostrar el resultado final.
- El análisis de estrés en la pala delantera demuestra que su base es vulnerable a esfuerzos mayores, debido a esto es necesario tomar cuidados adicionales con este segmento.
- Se realizó planos utilizando la herramienta de *Fusion 360* para así dejar documentadas las medidas necesarias para replicar el prototipo
- Se elaboró una tabla de materiales que permite determinar las herramientas necesarias para poder construir el modelo planteado.





## CAPÍTULO 12

---

### Recomendaciones

---

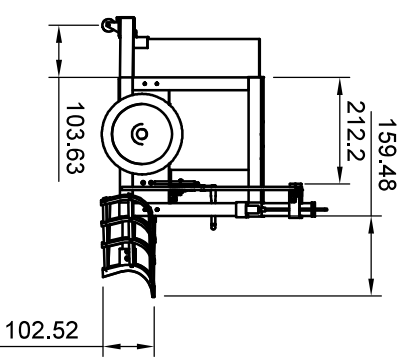
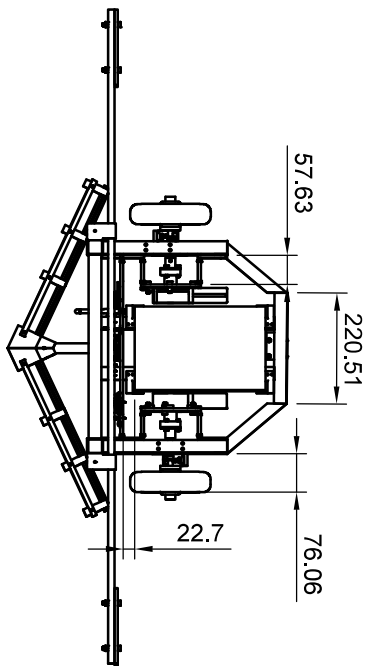
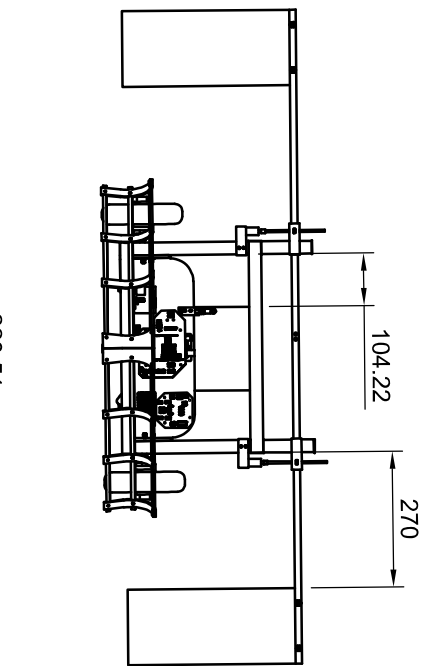
- Encontrar un balance entre peso y torque es uno de los pasos esenciales en el diseño
- Un mecanismo de levante para la aspas permite limitar mejor la interacción del café fuera del área de trabajo
- Generar análisis de estrés para cada pieza que sostenga una carga, de forma que se puede determinar los esfuerzos que soporta.
- Evaluar los méritos de la fabricación de los actuadores lineales sobre la compra de productos en el mercado
- Evaluar el desempeño de el sistema de llantas utilizados en este trabajo sobre otros tipos como las llantas oruga.



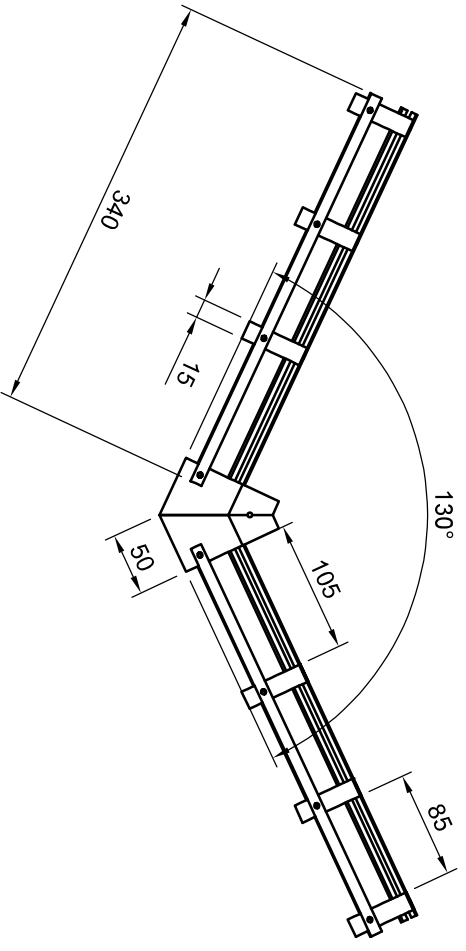
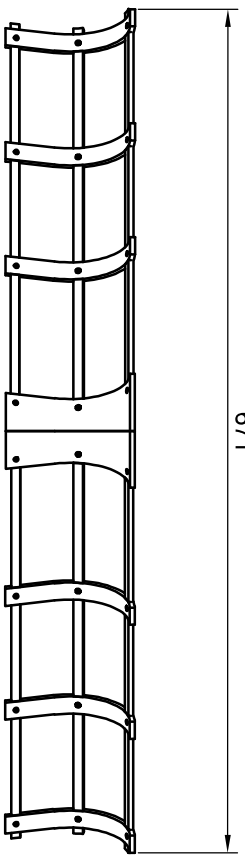
- [1] D. Oxigênio, *Guia dos Eletrodos de Tungstênio para Solda TIG*, nov. de 2014. dirección: <http://guias.oxigenio.com/guia-dos-eletrodos-de-tungstenio-no-processo-de-soldagem-tig>.
- [2] *¿Qué es la impresión 3D?: Tecnología de impresión 3D*. dirección: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>.
- [3] *FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!*, oct. de 2017. dirección: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>.
- [4] *Guía completa: plásticos en la impresión 3D*, jun. de 2020. dirección: <https://www.3dnatives.com/es/plasticos-impresion-3d-22072015/>.
- [5] K. M. Pell, “An Improved Displacement Snowplow”, *Strategic Highway Reaserch Program, University of Wyoming*, 1994.
- [6] Paguayo, *Motores paso a paso "stepper"*, jun. de 2019. dirección: <https://cursos.mcielectronics.cl/2019/06/18/motores-paso-a-paso-stepper/>.
- [7] Nelson, *¿Qué es un servomotor y cuándo se utiliza?* Dirección: <https://clr.es/blog/es/servomotor-cuando-se-utiliza/>.
- [8] *Actuador lineal*, mayo de 2019. dirección: <https://www.hisour.com/es/linear-actuator-42835/>.
- [9] j. s. Velandia, N. Rodríguez, Admin, V. L. Izquierdo, C. Galvis y J. Porras, *Autodesk Fusion 360*, dic. de 2018. dirección: <https://www.iac.com.co/fusion-360/>.



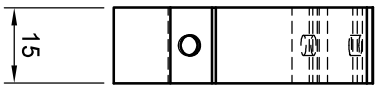
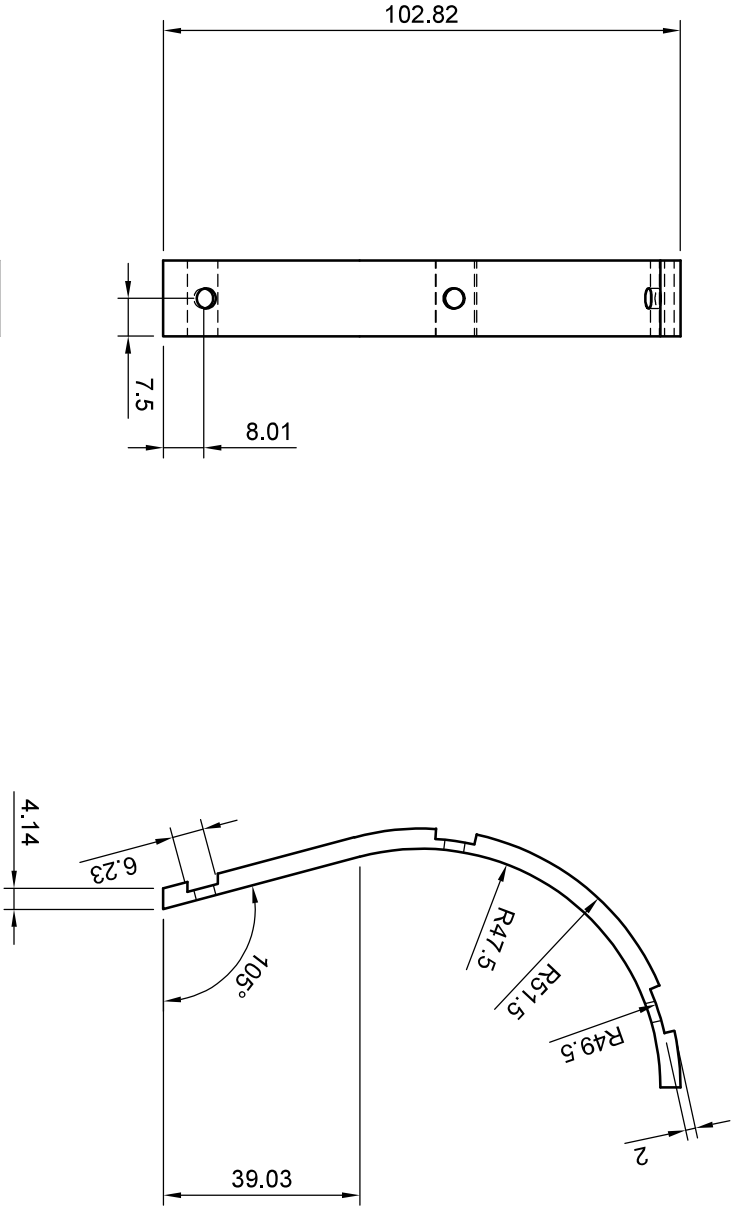
**14.1. Planos de construcción**



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovchel 2/10/2020	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	Robot Completo	1	
Rev.	Date of issue	Sheet	
	2/10/2020	1/1	

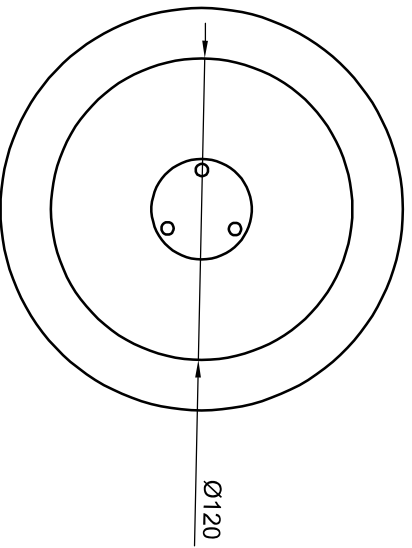
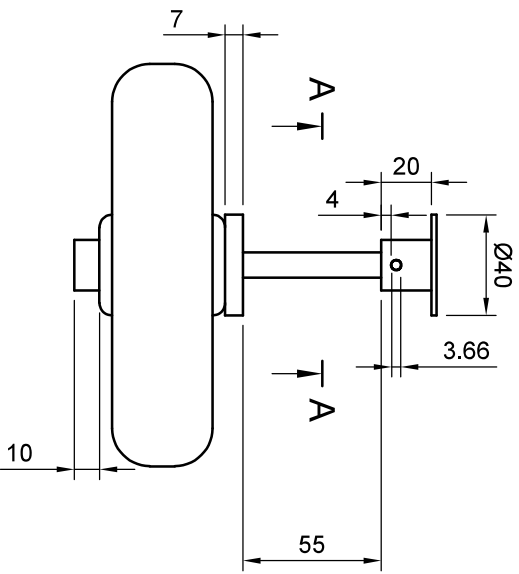
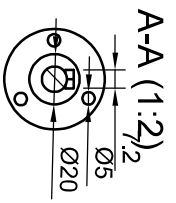


Dept.	Technical reference	Created by	Approved by	Rev.	Date of issue	Sheet
		Alejandro Winderovxhel 2/10/2020		7		1/1
		Document type	Document status			
		Title	DWG No.			
		<b>Pala Ensamblada</b>	<b>7</b>			

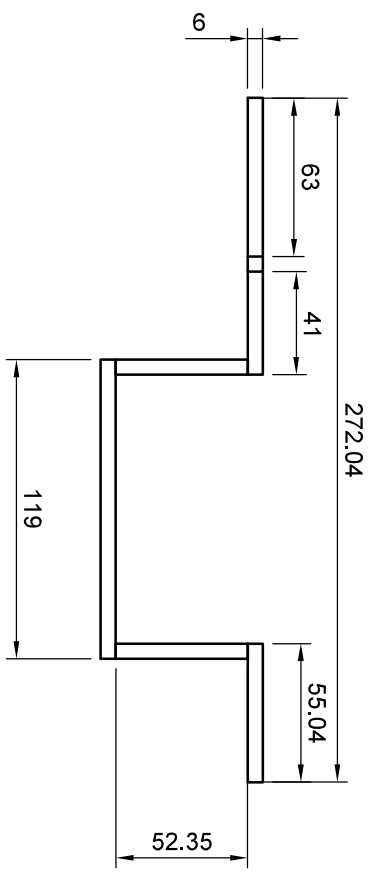
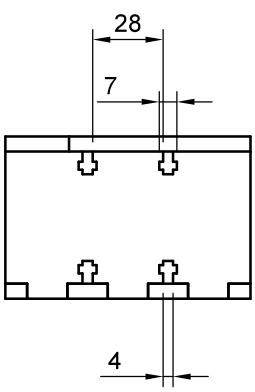
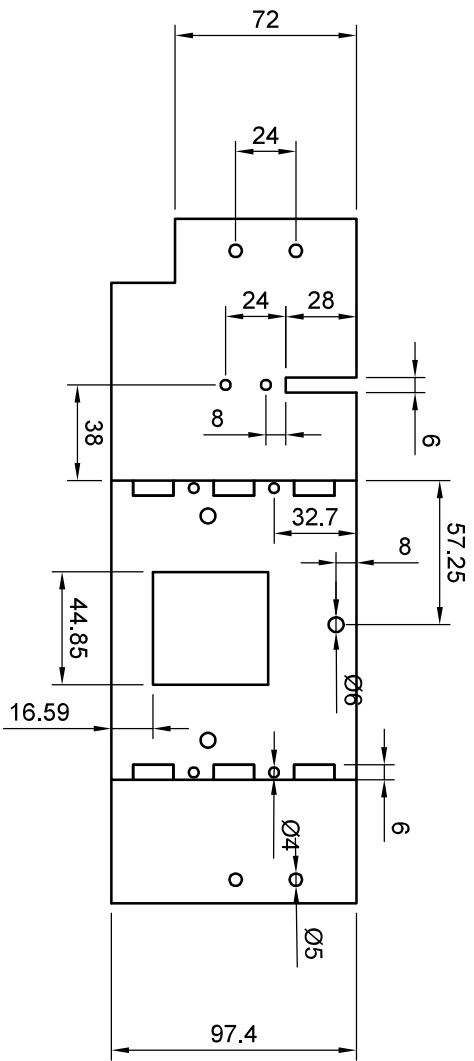


Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovichel 2/10/2020	
Title		Document type	Document status
Costillas Pala			
Rev.	Date of issue	DWG No.	Sheet
	2/10/2020	8	1/1

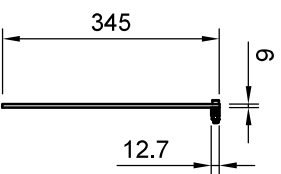
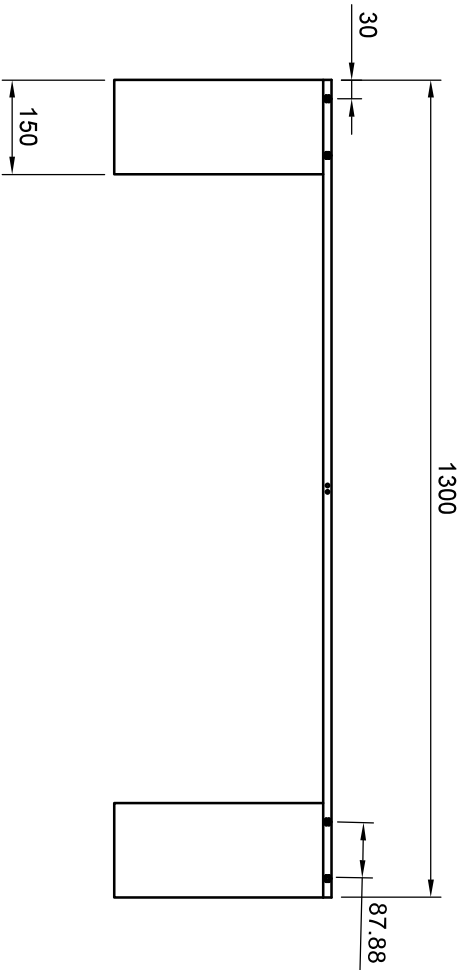




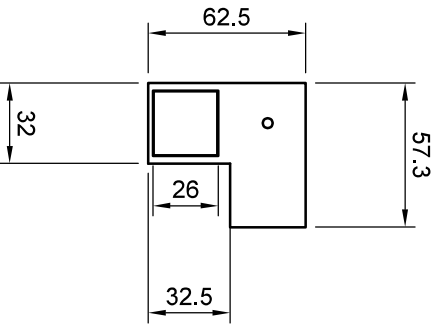
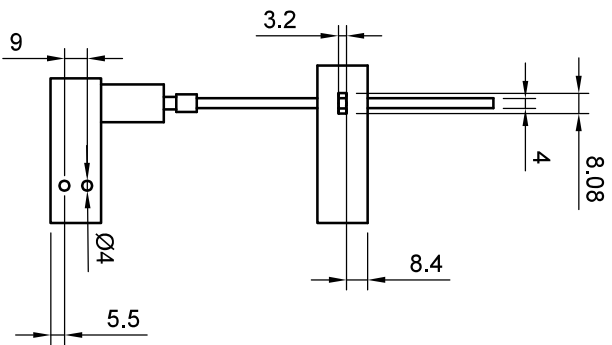
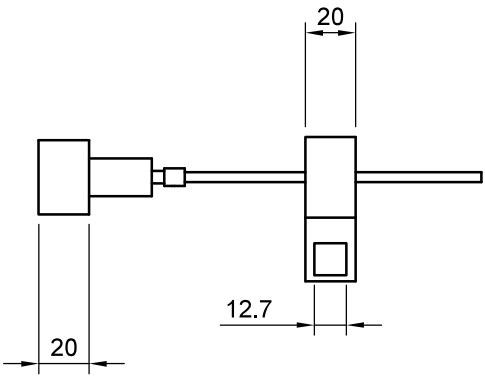
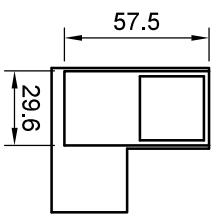
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovitel 2/10/2020	
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		Eje	4
		Rev.	Date of issue
		2/10/2020	2/10/2020
		Sheet	1/1



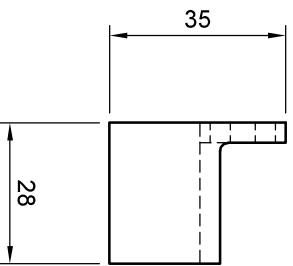
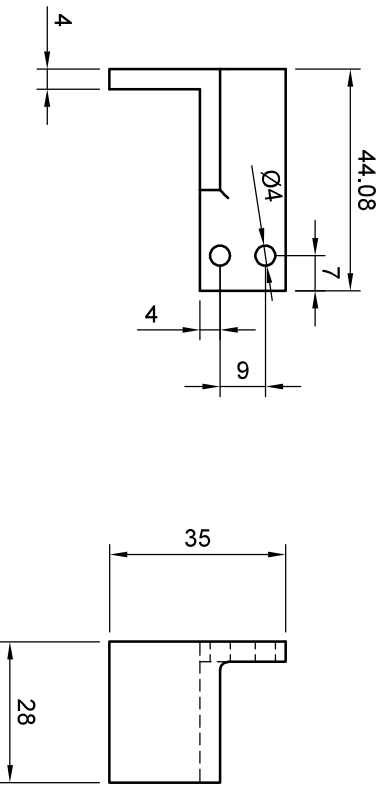
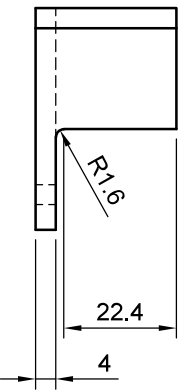
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovitel 2/10/2020	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	<b>Ensamble Para Motor</b>	<b>6</b>	
Rev.	Date of issue	Sheet	
	2/10/2020	1/1	



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovchel 2/10/2020	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	Rastrillos	2	
Rev.	Date of issue	Sheet	
	2/10/2020	1/1	



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovchel 2/10/2020	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	Actuador Lineal		
Rev.	Date of issue	Sheet	
	2/10/2020	1/1	



Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Alejandro Winderovchel 2/10/2020	
	Document type	Title	Document status
		Esquinera Bateria	
		DWG No.	Rev.
		5	Date of issue
			2/10/2020
			Sheet
			1/1