

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Rediseño e implementación de un robot móvil para el secado  
de café**

Trabajo de graduación presentado por Juan Pablo Zea Rubio para optar  
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2022







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Rediseño e implementación de un robot móvil para el secado  
de café**

Trabajo de graduación presentado por Juan Pablo Zea Rubio para optar  
al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

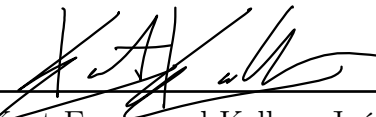
2022





Vo.Bo.:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Kurt Emmanuel Kellner Juárez

Tribunal Examinador:

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Kurt Emmanuel Kellner Juárez

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Pablo Daniel Mazariegos de la Cerda

(f)   
\_\_\_\_\_  
Ing. Pedro Ivan Castillo Rivera

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de enero de 2022.



Un camino bastante largo y complejo en el rediseño total de un robot con la capacidad de funcionar de forma automática y con un sistema funcional. No cabe duda que suena un tanto complejo, no deja de serlo, más no hubiera sido posible y hubiera sido mucho más complejo construir un robot de tal magnitud sin gran apoyo de mis compañeros y de mi asesor directamente. Muy agradecido de las correcciones, consejos, apoyo personal e ideas proporcionadas por mi asesor, quien sin duda influyó en mis decisiones sobre el rediseño del robot aportando grandes ideas y evitando fallas a simple vista del diseño.

Durante 5 meses sin parar día a día analizando, resolviendo y rediseñando desde nada cero el primer prototipo del robot secador de café. Dicho rediseño basado en rasgos del primer prototipo y muchas modificaciones y un montón de nuevos complementos como las palas retraibles frontales, la división en dos de la pala frontal para mayor rigidez. Como también el rediseño de todas las juntas del esqueleto del robot y los soportes directos de los motores de las llantas laterales. Implementando nuevas cosas tales como la defensa de las llantas laterales que como el limpiador de cepillo personal de cada llanta.



<b>Prefacio</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVI</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. Robot mecánico . . . . .	13
6.2. Cuerpo del robot . . . . .	13
6.3. Materiales adicionales para el robot . . . . .	14
6.4. Llantas . . . . .	15
6.5. Actuador lineal . . . . .	16
6.6. Cepillo cilíndrico . . . . .	17
6.7. Cepillo cilindro semiesférico . . . . .	18
<b>7. Rediseño del robot secador de café</b>	<b>21</b>
<b>8. Rediseño de la pala frontal</b>	<b>23</b>
8.1. Funcionamiento del sistema de pala frontal . . . . .	28
8.1.1. Prototipo 1 . . . . .	29

8.1.2. Prototipo 2 . . . . .	31
8.2. Rediseño de soportes verticales . . . . .	32
8.3. Rediseño de sistema retraible de pala frontal . . . . .	34
8.4. Prueba de esfuerzos de pala frontal . . . . .	36
<b>9. Rediseño de la estructura</b>	<b>43</b>
9.1. Prueba de esfuerzos del soporte de llantas laterales . . . . .	49
9.2. Rigidez de estructura de motores laterales . . . . .	52
9.3. Prueba de esfuerzos de junta de tubos . . . . .	54
9.4. Rigidez del material de junta de tubos . . . . .	56
<b>10. Implementación de defensa de llantas</b>	<b>59</b>
10.1. Prueba de defensa de llantas laterales . . . . .	61
<b>11. Implementación de sistema de limpieza de llantas</b>	<b>63</b>
<b>12. Listado de piezas y costos</b>	<b>65</b>
<b>13. Planos de fabricación</b>	<b>69</b>
13.1. Plano 1 . . . . .	69
13.2. Plano 2 . . . . .	70
13.3. Plano 3 . . . . .	71
<b>14. Conclusiones</b>	<b>73</b>
<b>15. Recomendaciones</b>	<b>75</b>
<b>16. Bibliografía</b>	<b>77</b>
<b>17. Anexos</b>	<b>79</b>
17.1. Planos de construcción . . . . .	79

---

## Lista de figuras

---

1.	Primer robot de la historia . . . . .	3
2.	Robot barredora prototipo competencia . . . . .	4
3.	Sistema interno de Roomba . . . . .	5
4.	Pala de nieve . . . . .	5
5.	Diseño de robot de café primera fase . . . . .	6
6.	Idea de tubo cuadrado de aluminio . . . . .	14
7.	Idea ejemplo de plancha madera . . . . .	14
8.	Idea ejemplo de lámina de aluminio . . . . .	15
9.	Idea de rueda plástica lisa . . . . .	16
10.	Actuador lineal . . . . .	16
11.	Cepillo ganadero . . . . .	17
12.	Cepillo para taladro . . . . .	18
13.	Chumacera . . . . .	19
14.	Modelo construido en primera fase . . . . .	21
15.	Modelo diseñado en primera fase . . . . .	22
16.	Palas frontales robot de café . . . . .	24
17.	Ensamble total de pala con base y tubo . . . . .	24
18.	Base motor de pala . . . . .	25
19.	Caja inferior de motor de pala . . . . .	26
20.	Caja superior de motor de pala . . . . .	26
21.	Relleno interno de tubo con espacio de tuerca para pala . . . . .	27
22.	Ensamble con base motor modificada y elevador de soporte . . . . .	27
23.	Movimiento de pala primer ángulo . . . . .	28
24.	Movimiento de pala segundo ángulo . . . . .	28
25.	Simulación de pala frontal Linkage . . . . .	29
26.	Pieza de esqueleto horizontal de pala frontal modificada a 2 piezas . . . . .	30
27.	Ensamble de dos soportes horizontales con soporte vertical medio de pala frontal . . . . .	30
28.	Modelo de nuevo rediseño de pala frontal . . . . .	31
29.	Sistema utilizando varilla 8mm . . . . .	31
30.	Nuevo rediseño en soporte central de pala frontal . . . . .	32

31.	Nuevo rediseño en soportes adyacentes a soporte central . . . . .	33
32.	Rediseño de soporte en físico . . . . .	33
33.	Prueba de sistema de pala frontal de metal . . . . .	34
34.	Rediseño de sistema de pala frontal PLA . . . . .	35
35.	Impresión en PLA del sistema de pala frontal . . . . .	35
36.	Ancho de pala frontal física . . . . .	36
37.	Profundidad de pala frontal física . . . . .	36
38.	Altura de pala frontal física . . . . .	37
39.	Ancho de la caja para obtener volumen de café . . . . .	37
40.	Profundidad de la caja para obtener volumen de café . . . . .	38
41.	Caja con café para obtener volumen de café . . . . .	38
42.	Análisis de peso frente a pala . . . . .	39
43.	Aplicación de fuerza en prueba digital Fusion 360 . . . . .	39
44.	Resultado de simulación de máximo estrés pala frontal . . . . .	40
45.	Resultado de simulación de factor de seguridad pala frontal . . . . .	40
46.	Resultado de simulación de desplazamiento pala frontal . . . . .	41
47.	Prueba con café del rediseño de pala frontal . . . . .	41
48.	Diseño de platina para juntas . . . . .	43
49.	Sistema impreso en 3D relleno de tubo y acuñador de tuercas . . . . .	44
50.	Estructura de únicamente tubos con rellenos impresos . . . . .	44
51.	Rediseño de uniones de tubos cuadrados . . . . .	45
52.	Diseño de estructura de tubos con platinas . . . . .	45
53.	Robot construido con el rediseño de estructura . . . . .	46
54.	Rediseño de base interna inferior . . . . .	46
55.	Rediseño de soporte de motor llantas laterales . . . . .	47
56.	Espaciadores de 10 mm para ensamble motor . . . . .	47
57.	Escuadra fijadora soporte de motor lateral . . . . .	48
58.	Ensamble total de llanta lateral con soporte . . . . .	48
59.	Ensamble de llanta en físico con soporte . . . . .	49
60.	Fuerzas aplicadas en prueba de esfuerzo llantas laterales . . . . .	49
61.	Fuerzas aplicadas en prueba de esfuerzo llantas laterales . . . . .	50
62.	Simulación del factor de seguridad para llantas laterales . . . . .	50
63.	Simulación de estrés para llantas laterales . . . . .	51
64.	Simulación de desplazamiento para llantas laterales . . . . .	51
65.	Rediseño para prueba pala frontal . . . . .	52
66.	Rediseño para prueba de soporte de motores . . . . .	53
67.	Prueba de motores y su nuevo diseño de soporte . . . . .	53
68.	Vectores de fuerza aplicados a prueba de junta de tubos . . . . .	54
69.	Simulación del factor de seguridad de junta de tubos . . . . .	55
70.	Simulación de estrés de junta de tubos . . . . .	55
71.	Simulación de desplazamiento de junta de tubos . . . . .	56
72.	Carga para prueba de juntas . . . . .	57
73.	Prueba de resistencia de junta con platina de acero . . . . .	57
74.	Prueba de resistencia de junta con platina de PLA . . . . .	58
75.	Prueba de resistencia de junta con platina de MDF . . . . .	58
76.	Escuadra de defensa de llantas laterales . . . . .	59

77.	Defensa de llantas laterales . . . . .	60
78.	Defensa de llantas laterales ensamblada . . . . .	60
79.	Defensa de llantas laterales ensamblada en robot . . . . .	61
80.	Fractura en del sistema de defensa de las llantas laterales . . . . .	61
81.	Diseño de ensamble de cepillo de limpieza . . . . .	63
82.	Listado de piezas para fabricación 1 . . . . .	66
83.	Listado de piezas para fabricación 2 . . . . .	67
84.	Listado de costos de piezas para fabricación . . . . .	68
85.	Plano de soporte de motores laterales MDF . . . . .	69
86.	Plano de tubo de estructura robot aluminio . . . . .	70
87.	Plano de platina de juntas PLA . . . . .	71



Dentro de esta fase del robot, se tomó en cuenta las deficiencias y mal funcionamiento del primer prototipo. Dicho prototipo fue inicialmente creado por estudiantes de la universidad como proyecto.

El presente documento resumirá detalladamente como fueron implementados los cambios al primer prototipo. El proceso de cómo se rediseñó su estructura en su totalidad por deficiencias en la estética y exactitud del robot, que se enfocó en las juntas como tales de los tubos con el fin de aplicar mayor rigidez con dimensiones exactas y a su vez atractivas. Así como también el rediseño total de la pala frontal, la cual resulto siendo más atractiva partida en dos pequeñas palas y agregándole una funcionalidad de pala retraible para cuando no sea necesaria, un sistema retraible logrado por medio de motores. Agregando también un nuevo componente que apoya la limpieza de las llantas, lo cual fue un tema discutido por los promotores del proyecto, siendo a su vez con las pruebas realizadas con el primer prototipo un tema que sin duda alguna debía ser implementado.

Dentro de la finalidad del proyecto se puede encontrar el pulir la idea de la estructura del primer prototipo para realizar mejoras, las cuales sean y presenten un avance en el proyecto general, que acerquen al robot cada vez más a su modelo final. Siendo la idea del robot, con la capacidad de ayudar a realizar una tarea bastante cansada y muy repetitiva, realmente una gran invención como tal que puede beneficiar mucho a gran cantidad de caficultores en no solo nuestro país Guatemala, sino que en muchos países más que utilicen el mismo método.

También como implemento a la estructura de las llantas fueron unas defensas, tipo pala rígida, con la finalidad de probarlas en el campo y ver si son o no necesarias para evitar el contacto casi por completo con los granos de café. Permitiéndole a la llanta aislarse casi por completo del café y todos los residuos que pueda filtrarse por debajo de las palas frontales principales. La estructura del robot es bastante sólida sin importar si es con soldadura o con juntas con tornillos, aunque aumenta más el peso así, no es lo suficiente para provocar un cambio muy radical o notorio en la actividad del robot. La capacidad de la nueva estructura prototipo para sostener los motores de las llantas presentó gran implemento al robot en cuanto a estabilidad más no es perfecta y requerirá más pruebas que modifiquen poco a poco el soporte para obtener mejores resultados.



Within this phase of the robot, the deficiencies and malfunctions of the first prototype were taken into account. This prototype was initially created by university students as a graduation project in past years. The project was proposed by a farm, which not only offered the theme of the project as a challenge for the students, but also made and continue to be in charge of financing the entirety of its creation.

This document will summarize in detail how the changes to the first prototype were implemented. The process of how its structure was redesigned in its entirety due to deficiencies in the aesthetics and accuracy of the robot, which focused on the joints as such of the tubes in order to apply greater rigidity with exact dimensions and at the same time attractive. As well as the total redesign of the front blade, which turned out to be more attractive divided into 2 small blades and adding a retractable blade functionality for when it is not necessary, a retractable system achieved by means of motors. Also adding a new component that supports the cleaning of the tires, which was a strong topic discussed by the promoters of the project, being in turn with the tests carried out with the first prototype an issue that undoubtedly had to be implemented.

Within the purpose of the project can be found polishing the idea of the structure of the first prototype to make improvements, which are and present an advance in the general project, that bring the robot closer and closer to its final model. Being the idea of the robot, with the ability to help perform a very tiring and very repetitive task, it is really a great invention as such that can greatly benefit a large number of coffee growers in not only our country Guatemala, but in many countries more than use the same method.

Also as a great implement to the structure of the tires were fenders, rigid shovel type, in order to test them in the field and see whether or not they are necessary to avoid contact almost completely with the coffee beans. Allowing the rim to be almost completely isolated from coffee and all debris that may seep under the main front blades

The structure of the robot is quite solid regardless of whether it is with welding or with screw joints, although it increases the weight more this way, it is not enough to cause a very radical or noticeable change in the activity of the robot. The ability of the new prototype structure to support the tire motors presented a great implement to the robot in terms of

stability, but it is not perfect and will require more tests that gradually modify the support to obtain better results.

A continuación se presentará la segunda fase del diseño mecánico del robot secador de café, el cual presentará grandes cambios basados a los resultados vistos en el primer prototipo. Como tal el documento se separa en cuatro diferentes modificaciones que se le realizarán al robot, con la esperanza de abolir en su totalidad los defectos obtenidos de la primera fase del mismo.

Como primera y más grande modificación se basa sobre la estructura total del robot. La cual luego de obtener dificultades con la estructura por la complejidad que presenta la soldadura de aluminio se modificó completamente. La solución propuesta consiste en meramente evitar soldaduras e introducir un cuerpo rígido por medio de tornillos. Dicho cuerpo se creará con la ayuda no solo de tornillos y tubos, sino que también se imprimirá en filamento plástico PLA de impresora en 3D un relleno que va acoplado dentro del tubo. Dicho relleno ayudará a sostener tuercas internamente y aplicando un soporte interno para evitar deformaciones del aluminio, siendo un material bastante blando. A su vez se necesitará ayuda de unas pequeñas platinas de material resistente que provea la unión entre un tubo con otro por medio de agujeros y tornillos. Siendo utilizadas las tuercas internas donde se enroscarán los tornillos, siendo dicho sistema funcional y estéticamente agradable, dado que únicamente la cabeza del tornillo quedará expuesta.

El tema del rediseño de la estructura como tal no solo abarca la armazón de aluminio del robot, su esqueleto, sino que también recibirá algunos cambios en la estructura interna. A su vez se espera que dichos cambios ayuden al funcionamiento correcto y estable de los motores por defectos previamente vistos en el primer prototipo por movimientos indeseados. Para ello se rediseñará la estructura de soporte de los motores de las llantas laterales para presentar menores vibraciones, los cuales se creen eran la causa de su inestabilidad. Presentando a su vez un soporte mucho más corto y estará sujeto directamente a la estructura de tubos interna inferior. Como anteriormente mencionado se realizará otro cambio en la posición de la estructura de tubos inferiores internos de soporte de batería. Su cambio será de una posición unida entre los tubos frontales y traseros a una posición los cuales estarán atornillados a los tubos laterales directamente.

Por otro lado se presentará también grandes cambios en la pala frontal y eliminar las palas laterales, lo cual se decidió por dificultades en la rigidez e inestabilidad su estructura y aun así mantener su peso ligero. Esperanzados que la pala frontal con sus nuevas modificaciones se capaz de realizar el trabajo deseado sin necesidad de las palas laterales originalmente implementadas. Como también se observará el cambio total de la pala frontal que por simplicidad y por algunos defectos presentados en el primer prototipo, se decidió separar la pala en dos para colocar dos soportes en el centro de cada una de ellas atribuyendo a su estabilidad y rigidez. Como también se explicará la modificación más grande que se le aplicó que fue la implementación de un sistema de control para el movimiento individual de las palas capaces cambiar así su ángulo y retraer la pala cuando ya no se necesite.

La limpieza es un tema realmente importante, según se nos presentó como condiciones indispensables para el robot. Para ello se podrá observar en este documento también una implementación de limpieza de las llantas por medio de cepillos giratorios. Los cuales con la ayuda de una estructura poco detrás de las llantas estarían en constante movimiento para así minimizar el acarreo de cualquier tipo de residuo proveniente del café. Con la finalidad de facilitar la limpieza del mismo, se aplicará un sistema de fácil montaje y desmontaje para que no haya la necesidad de tener que mojar o humedecer algún componente constantemente.

Como bien la limpieza de las llantas es de gran ayuda por medio de un cepillo, también se intenta reducir el contacto de las mismas con granos. Principal con la finalidad de reducir las perdidas en el contacto de la llanta con el suelo donde se encuentre rodando. Por ello se presentará también en este documento un sistema de defensa frontal de la llanta que se ideó como una pala frontal de una quitanieves, pero con modificaciones a la misma por el lugar, el ángulo del cual será sujeta y la falta de necesidad de una pala compleja.

Así como también se deberán de encontrar todos los planos del diseño total del robot, los cuales mostrarán las dimensiones exactas sobre ellos y su ensamblaje como tal. Como también mostrará una lista de piezas con sus materiales de los cuales fueron creadas cada una de ellas.

La automatización y movimiento sin necesidad de la ayuda humana ha sido una idea que redondea la mente de muchos en el mundo ya casi por un siglo. Desde la primera llegada del robot Elektro en los años 30 se le abrieron muchas puertas en la mente al mundo entero. Viendo en un pedazo de metal realizando algo referente a una acción humana fue un estallido en la imaginación de la gente. A pesar que en esos momentos la tecnología no lo hacía tan sencillo, todo ello fue mejorando hasta lograr lo que es hoy en día. Viviendo en un siglo completamente tecnológico, en la actualidad todo se quiere automatizar, dejar aquellas tareas que le hacen la vida difícil a un humano a algo que esta echo única y solamente para cumplir y acatar órdenes puntuales.[1]

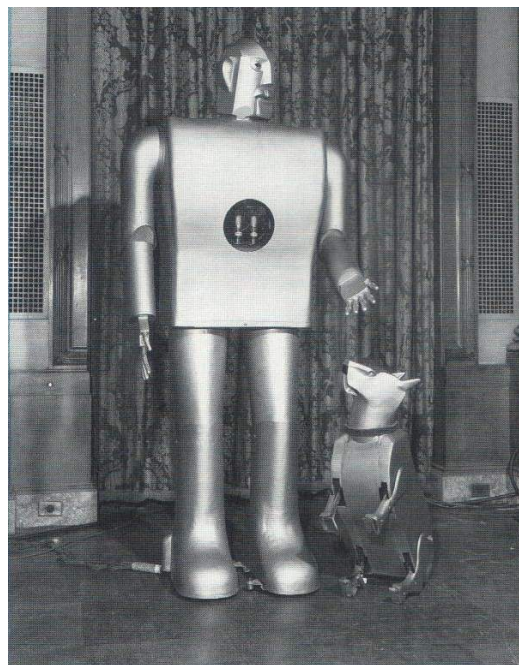


Figura 1: Primer robot de la historia

Con trabajos y vidas cada vez más demandantes ha sido necesario automatizar ciertas tareas que requieren nada más de un poco de paciencia, un poco de conocimiento pero muchas horas repitiendo y repitiendo lo mismo. Ya hace muchos años que en Guatemala, siendo un país con climas muy soleados y calurosos, se práctica el caficultivo. Aprovechando las herramientas que nos provee nuestro país no solo es posible cultivar café, sino que también es conveniente utilizar el sol como medio secador del mismo, ya cultivado y cosechado. A su vez desde el inicio del caficultivo el café como tal se seca en grandes áreas fundidas de cemento donde se aplica una capa de café a lo largo de ella y se seca por varios días a la luz del sol. Más no cabe mencionar que el café como tal no se mueve y volteo solo, que para ello se utiliza mano humana y la ayuda de herramientas tipo: rastrillos y palas, que mueve y volteo el café constantemente durante varias horas al día. Es aquí donde se encuentra la base del proyecto y es automatizar dicha tarea que es meramente repetitiva para maximizar el trabajo y perfeccionar la técnica de mover y voltear el café. Así como también un robot es bastante programable, puede llegar a ser capaz de realizar una mejor tarea que un ser humano la realizaría. Tomando en cuenta el inconveniente del cultivo del café, que los procesos que se llevan a cabo para lograr obtener granos de café es delicado y un pequeño cambio o error puede estropearlo todo u obtener un tipo de sabor del café distinto. Ello es precisamente lo que un humano puede cometer y lo que un robot puede evitar siendo programable para resolver situaciones anormales. [2]

Como tal para llegar a la idea del diseño del pequeño robot que automatizaría el proceso de volteado del café fue investigado la base y la proporción de un robot presentado en una competencia que se realiza en Alemania. Los que se presentan en dicha competencia exponen cualquier idea de robot que resulte, entre muchas universidades distintas de toda Europa. El robot en el cual se presto nuestra atención posee la capacidad prácticamente de barrer y está conformado por 4 llantas de hule y una pala frontal que rompe con la basura en el terreno y la recoge, albergándola en una pala trasera a los cepillos. [3]

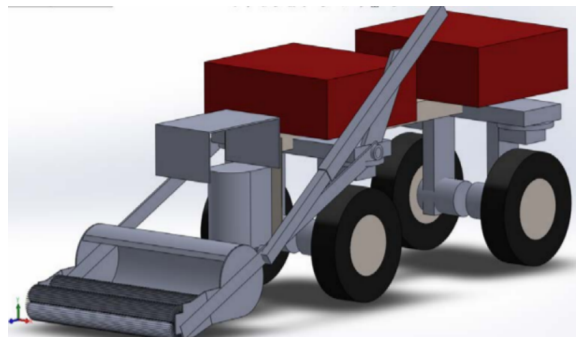


Figura 2: Robot barredora prototipo competencia

Además se estudió también la idea revolucionaria de hoy en día para el hogar, y ella es una aspiradora Roomba. Obviamente el fin del proyecto no es barrer ni aspirar, sino que es mover y revolver. Para ello solo se tomaron como idea ambos tipos de robot para obtener un modelo del cual partir para su funcionamiento y/o estructura del mismo. Tales como mecanismos de eslabones, que como ideas de movilizarse, sistema de giro de las llantas del robot Roomba, así como también datos físicos, como centro de gravedad y centro de masa.[3]

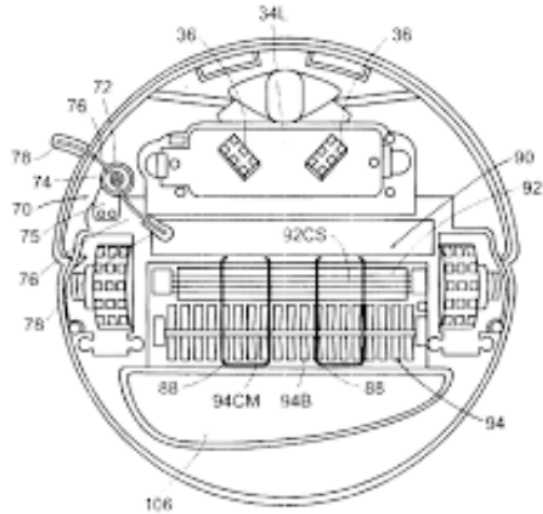


Figura 3: Sistema interno de Roomba

Tomando las distintas ideas de todo lo descrito anteriormente se logró establecer una estructura del robot, más no completamente funcional, dado que faltaba lo más importante del diseño y era como se iba a mover el café. Para solucionar la idea se utilizó la estructura de una pala para nieve que es comúnmente utilizada alrededor del mundo para mover la nieve del frente del vehículo y lanzar la misma nieve a un costado (rompiendo el camino). Siendo no solo una pala común, sino que posee un ángulo de inclinación en específico que previene que la nieve se acumule y sobrepase a la pala por el lado superior de la misma, permitiendo que la única salida de la nieve es meramente moviéndola a un costado (abriendo el camino).[3]

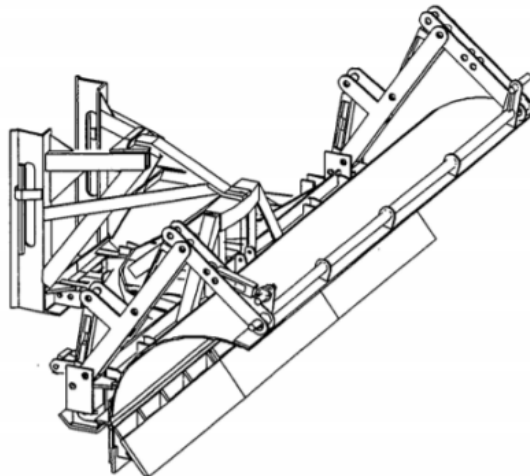


Figura 4: Pala de nieve

Como se hace mención a todo lo anteriormente descrito dentro del trabajo de graduación del presente proyecto solo que de la primera fase realizada por Alejandro Windevoxhel. Cada

análisis de la estructura, la pala frontal y los motores fueron realizados por él. El presente proyecto de graduación se basa en el proyecto de Alejandro, pero en una segunda fase en la que se realizarán mejoras que son descritas con total detalle dentro de metodología. El diseño finalizado de la primera fase se puede observar en la Figura 5. [3]

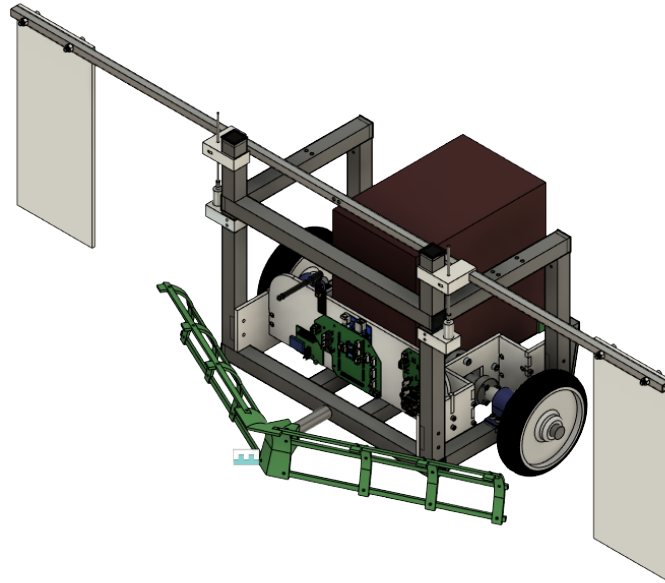


Figura 5: Diseño de robot de café primera fase

La idea por la cual el presente proyecto se inició fue propiamente para satisfacer una necesidad que se nos fue planteada por una finca en Guatemala llamada “El Injerto”. Su propósito, para agilizar el proceso de mover y revolver el café al momento de estar en su proceso de secado al sol. Así como también se necesitaba que fuese de fácil mantenimiento, duradero tanto en electrónicos que como en materiales bajo el sol por largos periodos y ser fácilmente replicado con los recursos dentro de la finca. El uso de un robot daría lugar a que los trabajadores de la finca se enfocaran más en otros procesos del maquinado posteriores o previos al secado del café y dejar el trabajo repetitivo, como lo es al momento del secado en patios, al robot.

A su vez mejorar el proceso del caficultivo tiene la posibilidad de impactar grandemente con la economía propia del país de Guatemala, dado que fue, es y seguirá siendo una gran parte de ella. Por lo tanto mejorar los procesos o agilizarlos puede llegar a ser de gran beneficio no solo para la finca “El Injerto” sino que también en un futuro al resto de caficultores y crecer como potencia cafetalera que somos. Al momento de que un robot con la capacidad esperada entre en diferentes fincas, no solo crecerá el poder económico de la misma, sino que es posible que también crecerá la demanda del producto de cultivo y a su vez posiblemente abrirá la puerta a mayor cantidad de empleos para la población guatemalteca. Teniendo un impacto ambiental nulo dentro de la finca dado que el robot será potenciado por el mismo recurso utilizado para secar el café, que es la luz solar.



### 4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un robot de movilidad autónoma que sea capaz de desplazarse entre granos de café con altura de hasta 5 centímetros.

### 4.2. Objetivos específicos

- Rediseñar la pala frontal de tal forma que sea capaz de cambiar el ángulo de ataque.
- Rediseñar el cuerpo del robot con el fin de mejorar rigidez en la estructura, la instalación de componentes y fabricación en general.
- Implementar una defensa para las llantas a tal modo que evite lo más posible el contacto con los granos de café.
- Implementar un sistema limpiador de llantas eficiente tal que evite el transporte de residuos de café.
- Realizar de forma detallada un listado de costos de la elaboración del diseño mecánico del robot.
- Realizar planos de fabricación para todos los componentes y partes mecánicas del robot de café.



El presente proyecto debe de alcanzar el rediseño positivo del robot ya creado dentro de la primera fase del mismo. Para ello lo primero que se alcanzará es el rediseño total de la pala frontal que rompe el café. Se logrará aplicando un nuevo diseño de la misma partiéndola en dos palas frontales en ángulos iguales, pero opuestos. Con ello logrará modificar el ángulo de la misma, siendo capaz de recoger como compuertas las dos partes de la pala. Por medio de dos motores adheridos a ellas, así como también con un sistema de eslabones y de tornillos sin fin. Evitando el acarreo indeseado de granos o fragmentos de café cuando el mismo no este dentro del área de trabajo o simplemente no se requiera del uso de la misma. A su vez se alcanzará la mejora de sus dimensiones implementando el prototipo previo de sus deficiencias. Obteniendo una gran implementación en lo que cabe la pala frontal protegiendo las llantas del café y también incorporándole más funciones.

Así como a la pala frontal, al cuerpo se le implementaran algunos accesorios que se espera que harán las obligaciones del robot mucho más fluidas en lo que cabe a objetos ajenos que pueden interferir de forma problemática el movimiento del robot. Para ello no solo la pala que rompe el café será usada como protección del cuerpo y llantas, sino que también se le incorporará a las llantas de forma individual una defensa, que ayudará a darle una protección extra contra los granos de café.

Para seguir con el alcance de las llantas, cabe mencionar que se debe implementar un sistema de auto-limpiado que esté en constante contacto con las llantas permitiendo limpiar cualquier fragmento o residuo de café que sobrepase la pala y la defensa de la llanta. Así como también ayudará a que cualquier limpieza que se requiera hacer, sea realmente sencilla.

Se decidió realizar un nuevo esqueleto con una mejor apariencia y de mayor resistencia. Dado el echo que la estructura como tal del robot, es y será de aluminio, por asuntos de peso, se había incorporado soldaduras las cuales no resultaron del todo bien por ser un metal realmente difícil de soldar y fácil de estropear. Por ello lo que se espera alcanzar es incorporar una estructura de aluminio de igual forma, solo que sustituyendo las juntas soldadas por juntas atornilladas con platinas de acero. Dándole así a la estructura rigidez, durabilidad, fácil ensamblado y a su vez precisión en medidas de la estructura.

A su vez se reinventarán soportes de llantas, como también de los circuitos, reacomodando todo su interior. Dado que el prototipo presentó algunos problemas en cuanto a su rigidez en los soportes de las llantas. Se incorporará un sistema más simple, pero asegurando con mayor firmeza el motor de la llanta, como sus componentes anexos.

A lo último que se puede mencionar de gran magnitud del robot, es la incorporación de un cuerpo como tal y no solo un esqueleto de aluminio como lo es el prototipo. Para ello se le incorporarán paredes al cuerpo completo, con facilidad de acceso a su interior con la finalidad de permitir su mantenimiento o reparación si es el caso.

### 6.1. Robot mecánico

El robot como tal por muchos años ha sido un método revolucionario para facilitar la vida de la gente y realizar tareas repetitivas o de mucho riesgo algo ya no muy necesario de hacerlas ellos mismos. Siendo el robot secador de café en patios una herramienta no tan reconocida, pero altamente efectiva por la facilidad de no depender en combustibles fósiles o electricidad. A su vez en ciertos países donde el calor y la intensidad del Sol es fuertemente elevada es una técnica muy viable. Siendo un trabajo realmente agotador y de varios días, un robot capaz de realizar todo de forma automática y aun así sin necesidad de costosas maquinas secadoras o de mucho combustible.[4]

### 6.2. Cuerpo del robot

Como parte del material de la estructura del cuerpo se escogió realizarlo de tubo cuadrado de aluminio. Dicha opción principalmente fue elegida con el fin de aportar el menor peso posible, dado que el aluminio es un metal útil para la construcción, aportando rigidez, y a su vez muy ligero cuando el peso es un elemento fundamental.

Entre otras propiedades del aluminio, aparte de su peso, es un metal altamente duradero. Dicha durabilidad va de la mano de la corrosión, la cual es extremadamente lenta y no afecta en la estructura del material casi en lo absoluto. No obstante dicho beneficio que tiene el aluminio también va de la mano de algunas desventajas, la principal entre ellas es la capacidad de conducir muy bien la temperatura a la que se le expone.[5]



Figura 6: Idea de tubo cuadrado de aluminio

### 6.3. Materiales adicionales para el robot

Para la estructura externa del del robot se debe de tomar en cuenta tanto la durabilidad, la economía y lo ligero del mismo. Para ello se incorporan dos materiales opuestos como tales pero ambos muy eficientes y únicos candidatos para el equilibrio de los elementos en los materiales que se buscan.[6]

Madera tratada con recubrimiento para exteriores, es un material bastante duradero, utilizado por muchos años y realmente ligero como tal. Por mucho la densidad de cualquier tipo de madera es prácticamente  $1/3$  de la densidad del aluminio, lo que le da grandes ventajas cuando un factor importante es el peso. Sin embargo la madera conlleva un ligero tratado que cada cierta cantidad de años debe de darse, de lo contrario se deteriora muy deprisa. A su vez la madera tratada puede llegar a ser un poco costosa, dependiendo de que tipo se busque en realidad.[7]



Figura 7: Idea ejemplo de plancha madera

El aluminio ha presentado grandes capacidades como material de estructuras a lo largo de mucho tiempo. Como se explico anteriormente en (Cuerpo de robot), el aluminio se utilizará no solo por su rigidez como metal, sino que por su durabilidad y por ser liviano. Por ello el aluminio toma parte también de una posibilidad como tal para la estructura externa del robot, dándole una alta durabilidad como casi ningún otro material, sino a su vez protegiendo el paso de la humedad al interior del robot. Por otro lado dicho material tiene la desventaja de ser ligeramente más pesado que la madera, pero más rígido en espesores pequeños en forma de "lámina". [6] [8]



Figura 8: Idea ejemplo de lámina de aluminio

## 6.4. Llantas

Llantas de polímero lisas son las que se esperan tener mejor eficiencia y mayor efectividad para el trabajo que se requieren. Con la finalidad de poseer un mejor control del robot en superficies tipo "patiosz evitar el traslado de residuos de café en ellas. Con mucha eficacia para movimientos de poca velocidad se adaptan muy bien en superficies lisas y poseen una durabilidad incomparable, frente a llantas de hule infladas. Con fines meramente de baja velocidad la alta fricción no es un factor del cual se debe de preocupar mucho, sino que los factores que presentan un gran rol en este uso es la durabilidad, la reducción de residuos y a su vez el poco mantenimiento.[9]

Con la capacidad de aguantar climas muy húmedos y muchas horas de trabajo las llantas lisas de polímero son las más adecuadas para la utilidad que se le dará. Principalmente con la ventaja que son muy sencillas de limpiar y no son afectadas por algún tipo de objeto corto-punzante que se le puede presentar en su camino.[9]



Figura 9: Idea de rueda plástica lisa

## 6.5. Actuador lineal

Con el fin de poder realizar un cambio en la pala ya existente del robot, lo cual le dará el poder de cambiar el ángulo de forma horizontal de la pala para así recogerla cuando no se necesario romper con el café. Se espera implementar un sistema con dos actuadores lineales, uno para cada lado de la pala. Dicho actuador lineal funciona de tal manera simple con un motor DC, el cual le permitirá girar un tornillo sin fin permitiendo el desplazamiento únicamente sobre un eje de una tuerca que permitirá empujar o retraer el objeto adherido a ella. [10]



Figura 10: Actuador lineal

Un componente electrónico bastante sencillo que fue inventado no hace demasiado tiempo con el fin de movilizar ciertas cosas con control y no utilizar bandas motorizadas o simplemente darle un golpe al objeto. Con una desventaja rotunda que el actuador fue hecho para ejercer dirección de movimiento y un tanto de fuerza y para un funcionamiento correcto, evitando fracturas del tornillo, se le debe de acomodar una guía o algún objeto que le quite parcialmente fuerzas aplicadas al actuador en sí.[11]

## 6.6. Cepillo cilíndrico

Un objeto que mucha gente puede imaginar es un cepillo en forma cilíndrica, muy parecidos a los que vemos en muchos lados hoy en día, por ejemplo: carwash, barredoras, electrónicos de limpieza, cepillos limpia ganado, entre otros. Cada uno de los ejemplos nos permiten dar una breve idea de cual es el cepillo que se intenta describir. El principal enfoque de la investigación del cepillo es en cuanto a su eficacia para limpiar de forma giratoria algún tipo de objeto. Específicamente se investigó dentro del trabajo de tesis de Alejandro Windevoxhel el funcionamiento del robot Roomba que posee un cepillo cilíndrico. Así también se investigó un cepillo que es común en latinoamérica para uso ganadero, que cumple la misma función que el cepillo para barrer el piso del robot Roomba. Con el fin de remover suciedad de una superficie, el cepillo es activado por un motor que permite el girado del mismo y así cumplir su función. De forma muy sencilla no hay mucho más que se deba de explicar, más que para el presente proyecto se enfocó la idea únicamente en el cepillo como tal y su extraña pero muy útil forma, y no precisamente en su mecanismo.[12]



Figura 11: Cepillo ganadero

## 6.7. Cepillo cilindro semiesférico

Una figura geométrica que sonará complicada, más es una forma de cepillo plástico que abunda en muchos accesorios de limpieza de toda clase hoy en día. Siendo útiles para limpiar suciedad en lugares profundos, teniendo la ventaja de poseer cerdas tanto en el frente como a los costados en una forma cilíndrica. Agregándole un giro circular al cepillo se transforma en una gran utilidad para casi cualquier superficie existente.[13]

Ideales para limpiar llantas y muy utilizados en gran cantidad de lugares donde asean un automóvil. Es perfecto para limpiar el material como caucho o algún tipo de plástico, permitiendo que con sus cerdas duras y gruesas, tengan un menor desgaste cuando está en contacto con el hule o plástico, así como también cumpliendo su función de limpieza.[13]

Con una gran facilidad de montar y desmontar por su varilla hexagonal, para uso en un mandril de un taladro comúnmente o también en una base que le permita un giro completamente libre al mismo, tal como una chumacera, con un diámetro de 6 mm aprox. (1/4 pulg.) y puede observarse en las figuras a continuación. Pensando la ideal para que los usuarios que deseen limpiar dicho cepillo, sea altamente sencillo desmontar y montar a una estructura adjunta a una llanta y cumplir su función de limpieza giratoria con cerdas plásticas.[13]



Figura 12: Cepillo para taladro



Figura 13: Chumacera



---

### Rediseño del robot secador de café

---

El presente proyecto de graduación se basa en la primera fase del robot previamente diseñado y construido por estudiantes de la universidad. Con la finalidad de rediseñar su estructura, su funcionamiento e implementar mejoras se construyó un segundo robot. Dicho robot se basó en la idea original dentro de la primera fase, esto se puede observar en la Figura 5 de forma digital.

Para rediseñarlo con la finalidad de mejorar deficiencias se analizó no solo el diseño digital sino que también el robot físicamente. El robot concluido de la primera fase, que puede observarse en la Figura 14, resultó indicando potenciales modificaciones en cuanto a su funcionamiento y diseño. Tales modificaciones indicaron rediseñar las juntas, por la dificultad de soldar aluminio, la pala frontal, por ser un diseño disfuncional, y las palas aéreas laterales, por ser un implemento poco funcional. La primera fase contribuyó a implementar mejoras y nuevos complementos al mismo robot, las cuales se explican detalladamente dentro de los siguientes capítulos.



Figura 14: Modelo construido en primera fase

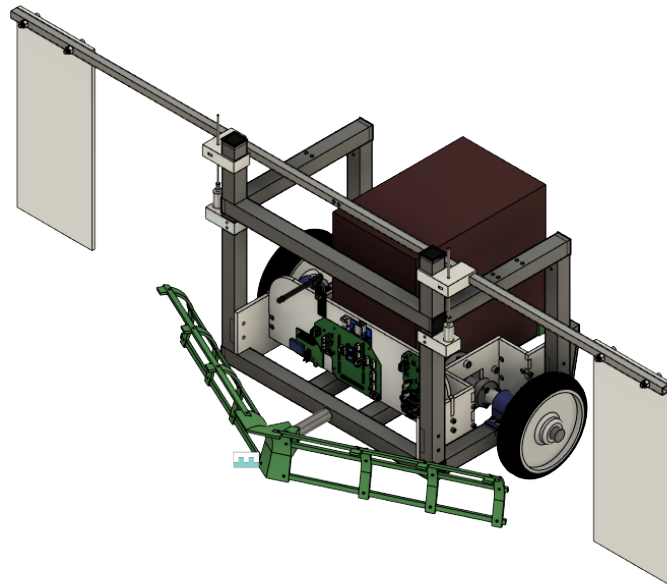


Figura 15: Modelo diseñado en primera fase

---

## Rediseño de la pala frontal

---

Por lo observado en las deficiencias de la pala frontal del primer prototipo se decidió rediseñar su funcionamiento, manteniendo como base su forma y parte del diseño. Aplicando lo experimentado del ya existente prototipo fueron necesarios varios implementos y ajustes al ya existente diseño. Para ello se decidió modificar su funcionalidad agregando movimientos que previamente no tenía, quitando la rígida pala con un solo soporte central y agregándole un poco de control a la misma, dependiendo las necesidades del usuario. A su vez también se alteró el largo de la misma para definir una defensa más viable para las llantas que se mantenían bastante expuestas a granos de café, que afectarían su funcionamiento.

Basados en el esqueleto de la primera pala, ella fue partida en dos justo por la mitad y a ella fue agregado un sistema de tornillo sin fin con movimiento motorizado controlado. Dicho movimiento le da al operador del robot el control de cuándo rompe o no con el café, elevándola unos cuantos centímetros del suelo así evitando acarrees indeseados de granos o residuos de los mismos.

La estructura como tal en forma de pala de nieve sigue siendo la misma con el cambio que en el centro de la pala ya no existe una junta que une ambos ángulos de la pala en sí, sino que son dos palas independientes. Cabe mencionar que de igual forma no podían dejarse las dos extremidades de las palas de forma independiente y al mismo tiempo de largos idénticos y por ello se rediseñaron distintas entre sí, aunque ambas con el mismo sistema de retracción.

De igual forma las dos palas laterales del previo prototipo, observado en la Figura 5, no fueron de gran ayuda en las pruebas realizadas por dificultades de control y se decidió eliminarlas. Reanalizando el propósito de las mismas, se concluyó que no son del todo requeridas y por ello se decidió mejor alargar las palas frontales y eliminar el sistema de las palas laterales en su totalidad. Para el rediseño de la pala frontal, el cual se puede observar en la Figura 16, se reutilizaron los motores de las dos palas eliminadas laterales.

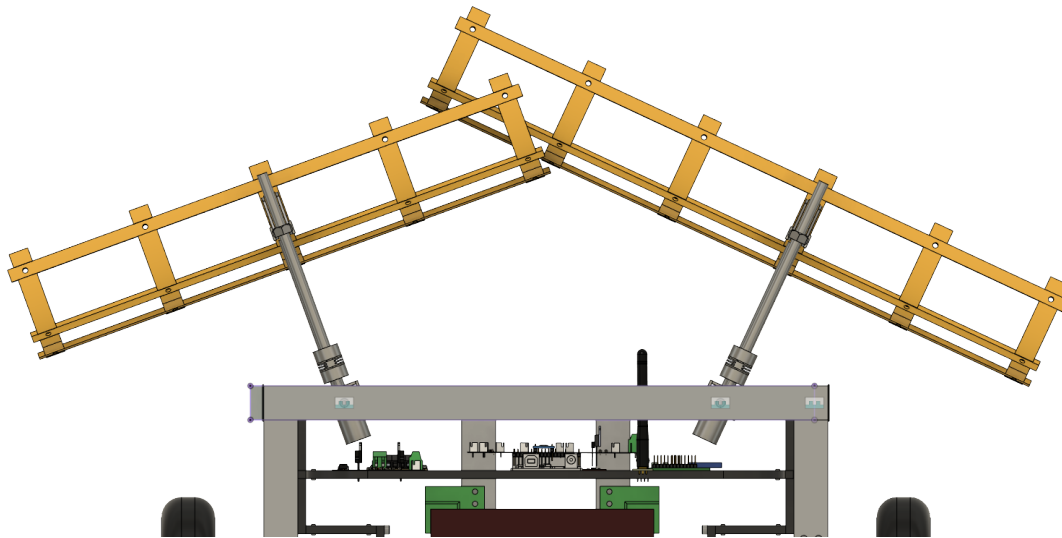


Figura 16: Palas frontales robot de café

La funcionalidad del sistema de motores en la pala frontal es simplemente para ayudar el traslado del robot cuando no se encuentre dentro del patio de café y no se desee que se dañe con algún objeto. El sistema que la acompaña es meramente un tornillo sin fin sujetando una tuerca soldada con un sistema de eslabones que permitirán el movimiento vertical con un movimiento horizontal de la tuerca. El sistema completo está sujeto por medio del tornillo sin fin al acople flexible de motor DC, reutilizado del primer prototipo. Se puede observar el sistema con mayor detalle en la Figura 17.

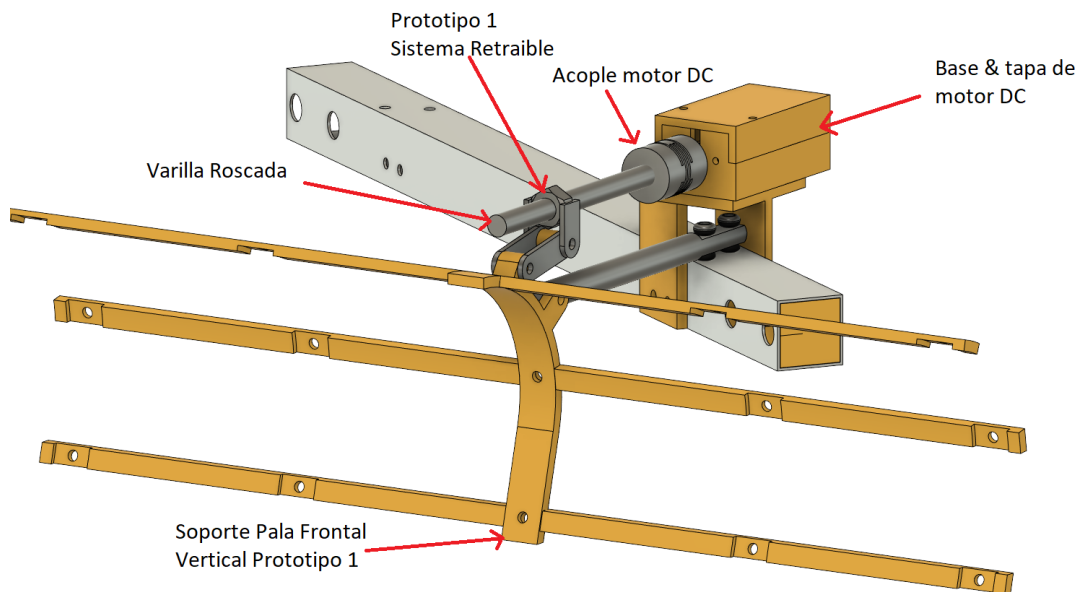


Figura 17: Ensamble total de pala con base y tubo

Así también por alguna utilidad que el usuario del robot requiera, tal como obtener una capa de granos más espesa cuando pasa el robot, que también puede ser definida dependiendo lo retraída que este la pala con ayuda del sistema anteriormente descrito. Otra función del mismo también sería manipularlo por el tamaño del grano que se obtenga o que se quiera separar de los granos un tamaño en específico, dejando pasar debajo de la pala únicamente aquel grano menor al espacio definido por la retracción de la pala. Para ello también cabe mencionar que si se desea dicha función de la pala, cada una de las llantas de los costados posee una defensa propia que evitará de cualquier forma que el grano entre en contacto con la misma.

Realizando un rediseño al soporte del motor de la pala, siendo el diseño que se pensó originalmente un poco pesado, anticuado y a su vez un tanto ineficiente por la posibilidad de movimientos incontrolados de la varilla de soporte de las palas que son aquellas que pasan por debajo del motor directas a la pala y siendo el pivote de giro de la misma.

Para ello se rediseñó una base en la cual encaje de forma exacta el motor con una tapa que forme como tal una estructura aislada para evitar el exceso de polvo interactuando con él. A su vez se rediseñó el seguro de la varilla que es el soporte de la pala que pasa por debajo del motor, aplicándole ahora dos tornillos de menor calibre pero mejorando la estabilidad y rigidez de la misma. A continuación se podrán observar los diseños anteriormente descritos.

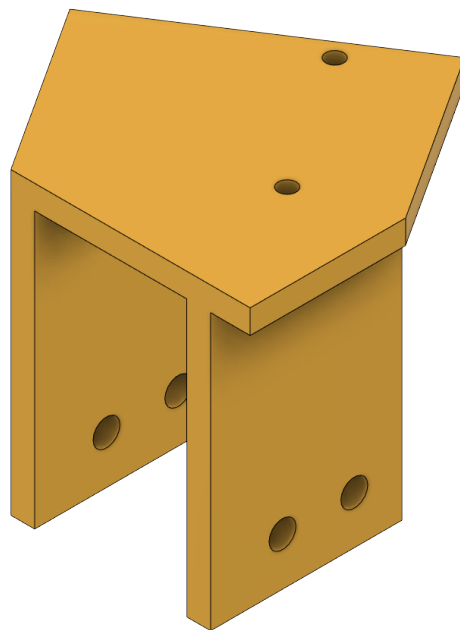


Figura 18: Base motor de pala

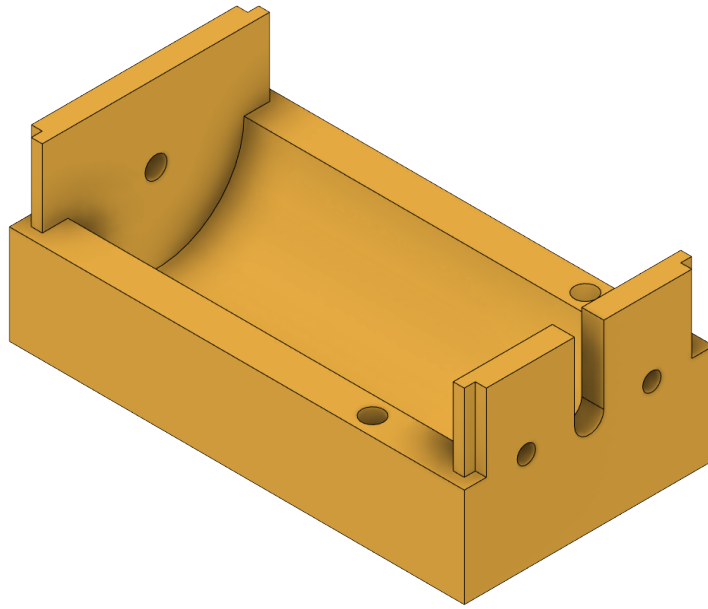


Figura 19: Caja inferior de motor de pala

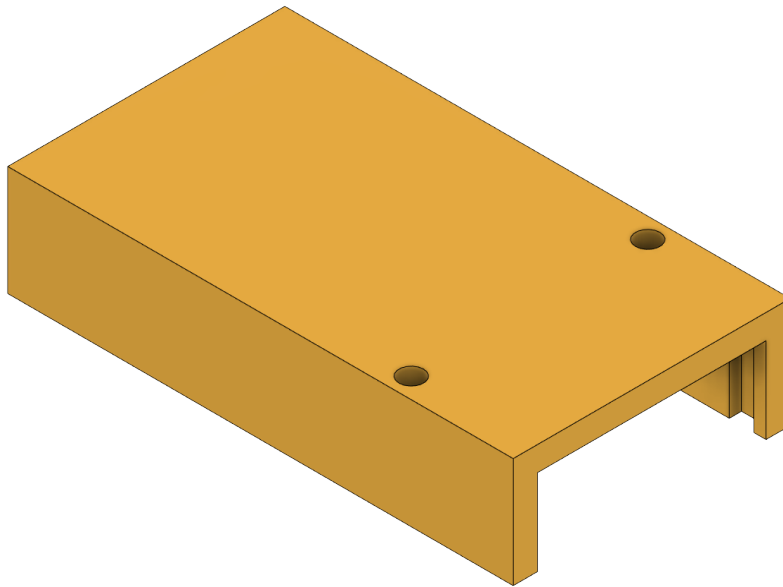


Figura 20: Caja superior de motor de pala

De igual forma se aplicó un método que permitió acuñar la tuerca en un espacio específico dentro de una estructura impresa que se introdujo dentro del tubo cuadrado, lo que permitirá enroscar el tornillo dentro del tubo sin necesidad de sostener la tuerca con algún tipo de llave. Para así concluir con un diseño y un soporte de pala con bastante rigidez y funcional en lo que cabe.

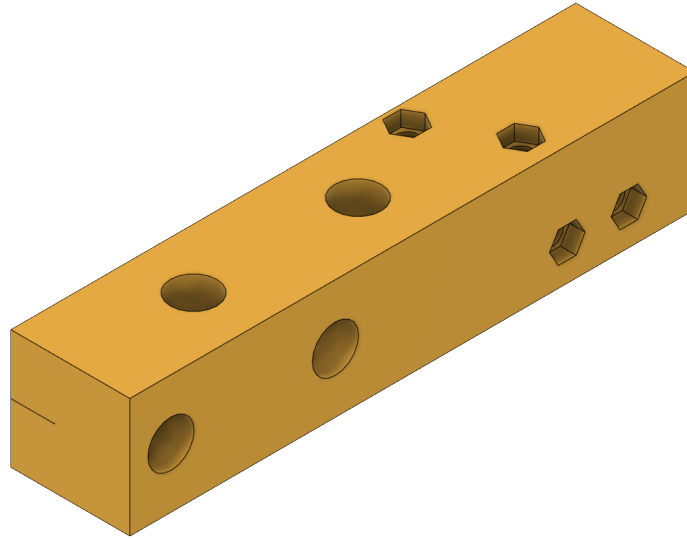


Figura 21: Relleno interno de tubo con espacio de tuerca para pala

Con la finalidad de ajustar altura de la pala frontal, estando la dicha muy baja y esto afectaría el rose con el pisto por la altura que existe del robot y el suelo que pase por debajo. Para ello se modificó la base del motor, que realmente es libre de ser modificada dado que no tiende a soportar grandes esfuerzos más allá que el peso del motor y sus movimientos con el acople. Debajo de la base del motor se encuentran únicamente los soportes de la pala frontal los cuales únicamente se elevaron del contacto directo con el tubo y se introdujo un elevador de impresión en 3D solida. Concluyendo con la pala frontal a un nivel que ya es óptimo para su funcionamiento.

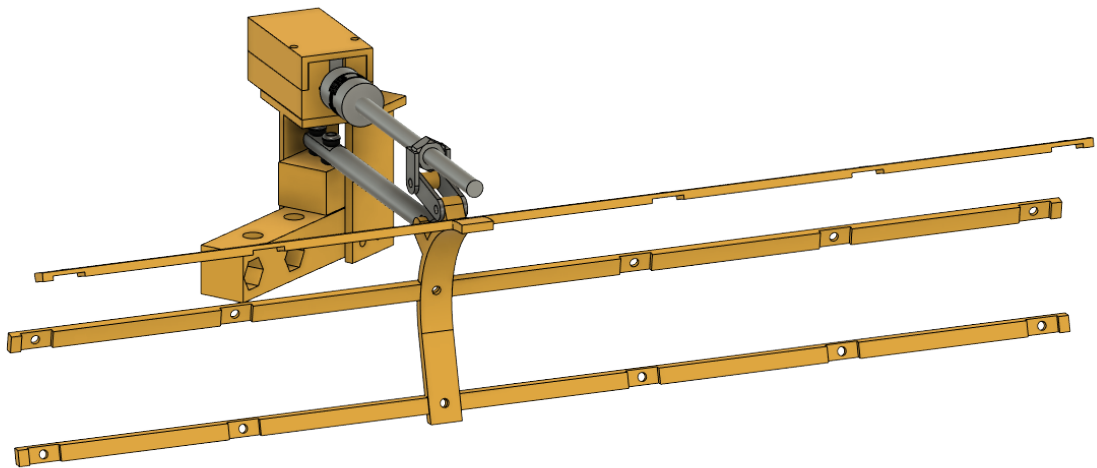


Figura 22: Ensamble con base motor modificada y elevador de soporte

## 8.1. Funcionamiento del sistema de pala frontal

Para verificar el sistema de la pala frontal, inicialmente se realizó el diseño en Fusion 360. Con la ayuda de los movimientos que se le pueden configurar a las piezas ensambladas dentro del programa, se logró corroborar la capacidad del sistema de moverse. A pesar que el ensamble y sus movimientos, que pueden observarse en la Figura 23 y la Figura 24, no es igual que construirlo, nos ayudó a verificar que la idea plateada transcurría por un buen camino.

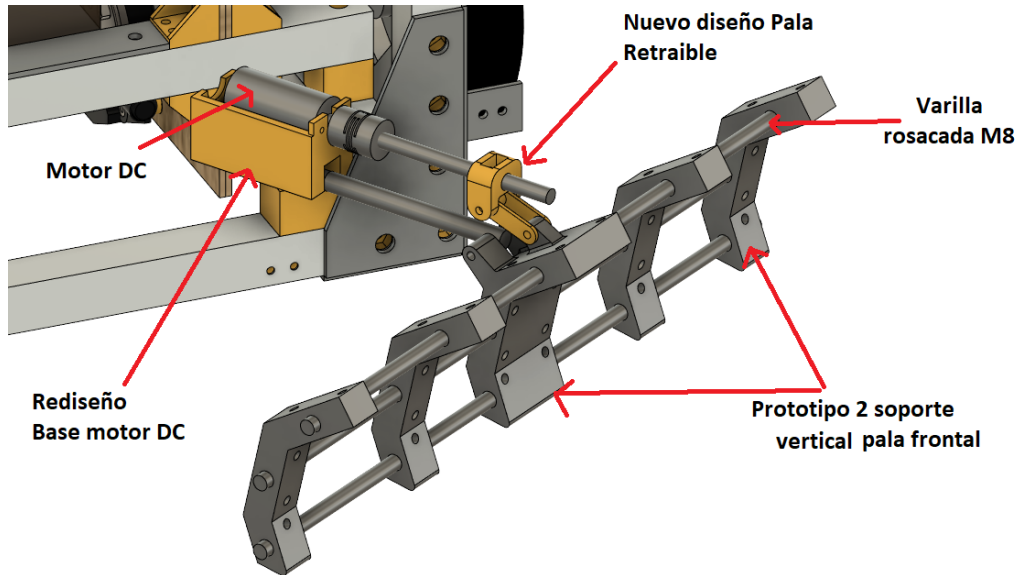


Figura 23: Movimiento de pala primer ángulo

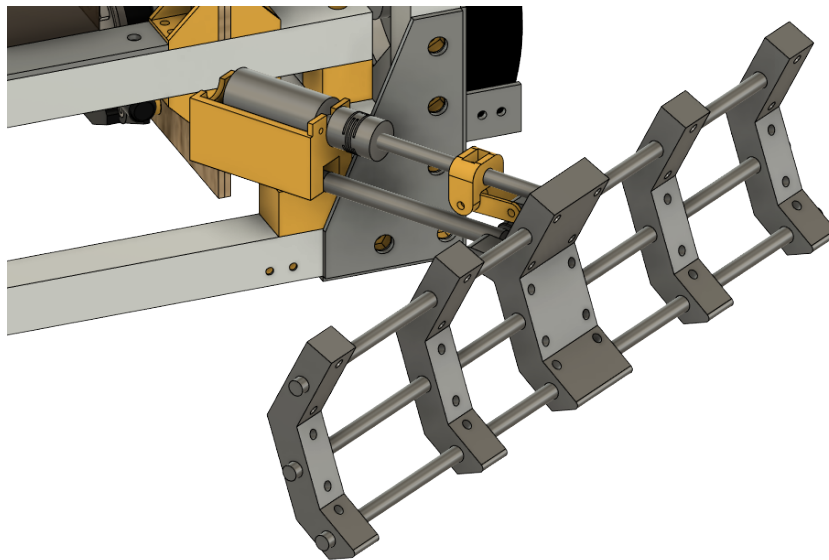


Figura 24: Movimiento de pala segundo ángulo

Corroborando el sistema diseñado se decidió simularlo dentro de otro programa de computadora llamado Linkage, que fue creado para simular específicamente dichos movimientos. Verificando no solo el funcionamiento como tal sino también con dimensiones reales del sistema, estando aun más apegado a la realidad del diseño. Para dar seguridad al sistema, se utilizaron herramientas del programa que permitió realizar una especie de dibujo del mismo.

Dentro de la plataforma de Linkage es posible observar únicamente líneas, que se puede ver en la Figura 25, de las cuales de J a C y de C a B, son precisamente los eslabones en movimiento. La línea horizontal superior es representativo para el tornillo sin fin que va directamente al acople del motor. Y la línea naranja que une los dos eslabones con la línea superior azul, de J a N, es el soporte de la pala frontal. La prueba en el programa consistió en saber si el tamaño de los eslabones no afectaría el movimiento y a su vez darnos una mejor idea del movimiento semi circular que el sistema realizaría.

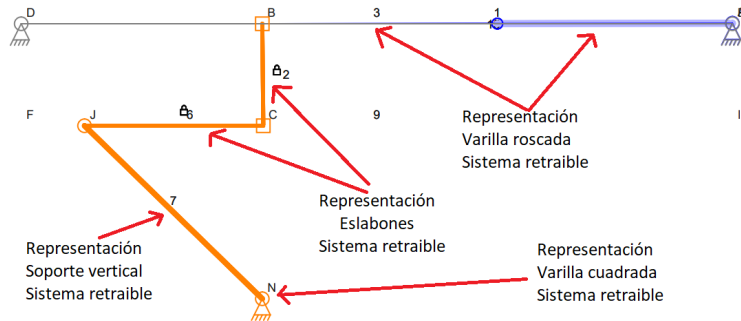


Figura 25: Simulación de pala frontal Linkage

### 8.1.1. Prototipo 1

Por cuestiones de espacio de la base de la impresora encargada de imprimir las piezas de la pala en PLA en 3D, se requirió modificar el largo del esqueleto de las palas frontales. Dado que su máximo es de 330 mm y ninguna de las piezas de la pala frontal cumplían con ese largo máximo. Con la finalidad de no afectar el diseño ya construido y únicamente permitirle ser impreso se recurrió a cortar dichas piezas horizontales por la mitad, de tal modo que fuese posible ser impresas dentro de las máquinas a mi disposición.

Por otro lado si las tiras de esqueleto horizontal se partieran directamente a la mitad, existiría un corte de los mismos justo donde se atornilla una tuerca y un tornillo en la costilla que es agarrada por el sistema de pala retraible o en el caso de la pala con esqueleto más largo, el corte sería en un lugar sin posibilidad de soporte o tornillo. Por lo tanto se decidió realizar un corte estratégico, donde fuese posible ensamblar todo y aun así mantener los tornillos de las costillas donde se encuentran originalmente. Dicho eso se realizaron cortes justamente donde se encuentra la costilla central de su estructura, la cual mantiene la menor cantidad de esfuerzos por estar directamente conectada al soporte y estar lo menos lejano al mismo también.

Por lo tanto se convirtieron de ser únicamente tres piezas horizontales largas, a ser seis piezas horizontales unidas por un tornillo encajando las dos piezas una con la otra

exactamente detrás de la costilla de soporte medio, la cual se puede observar en la Figura 19 anteriormente. A continuación se presenta el diseño modificado propuesto para la solución del problema de impresión presentado.

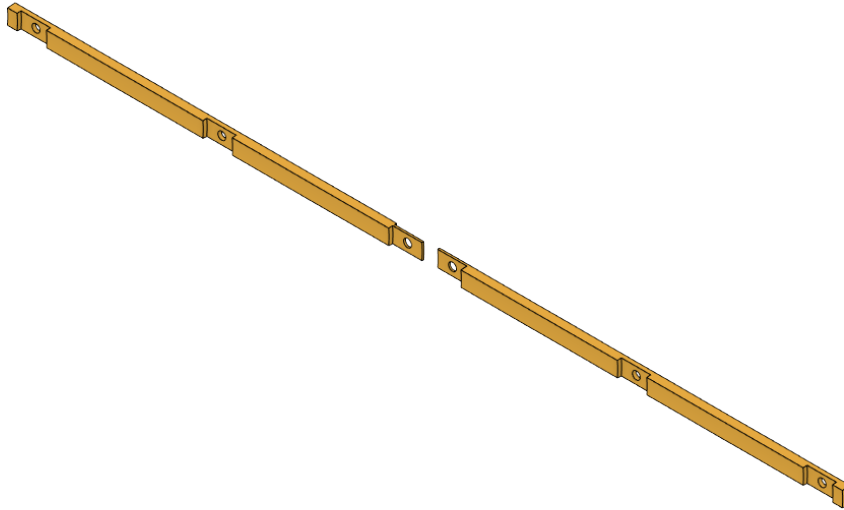


Figura 26: Pieza de esqueleto horizontal de pala frontal modificada a 2 piezas

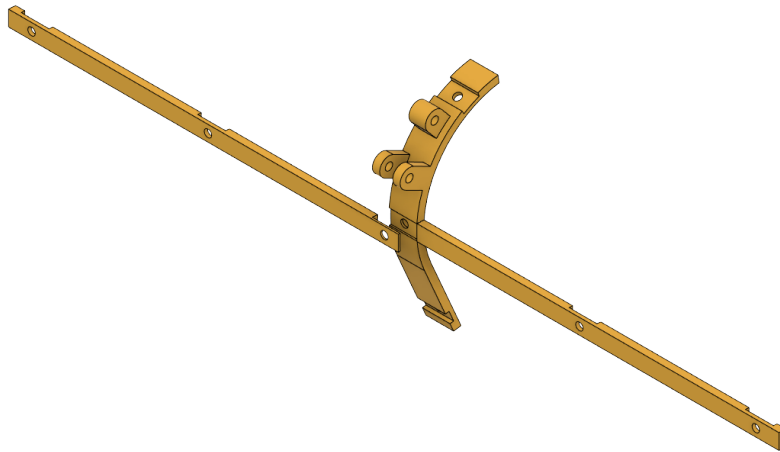


Figura 27: Ensamble de dos soportes horizontales con soporte vertical medio de pala frontal

Tras una serie de impresiones en PLA en 3d, se decidió que el sistema anteriormente descrito no solo presentaba gran debilidad sino dificultad de impresión. Las fuerzas a las que estará sometida la pala frontal son bastante grandes, tras pruebas físicas realizadas con la facilidad se quebraba el material. Por ello se decidió cambiar de estrategia y montar un sistema que no fuese impreso en su totalidad en PLA y permitiera soportar una mayor cantidad de fuerza.

### 8.1.2. Prototipo 2

Analizando los cambios se decidió cambiar de impresión en PLA en 3D a una varilla acerada roscada que permitiese sujetar de paso con tuercas y roldanas. Dándonos dos ventajas en la manufactura, que es mucho más sencillo adquirirlas por su ya existente comercio y a su vez su rapidez de manufactura que no se requiere crearlas como tal únicamente ser compradas. Eliminando por completo el diseño con un nuevo rediseño utilizando únicamente varillas, el cual se presenta a continuación.

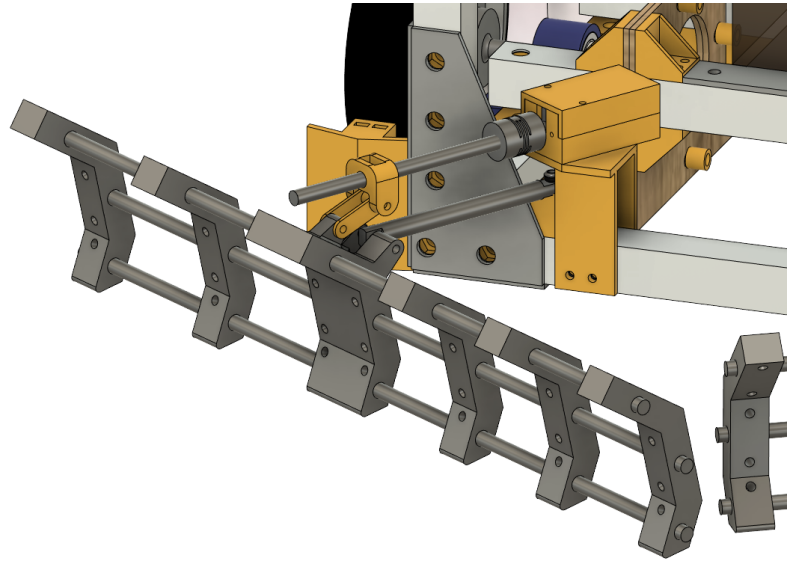


Figura 28: Modelo de nuevo rediseño de pala frontal

Un diseño algo inusual pero capaz de cumplir con lo propuesto, donde únicamente se utilizaron varillas M8, comprada comercialmente, tuercas M8 y roldanas M8 para sostener las mismas. Siendo una pala algo pesada, pero bastante sólida que cumplió con lo propuesto y logró ser construida tal y como se había diseñado en digital como puede ser visto en la Figura 28 y en la Figura 29 .

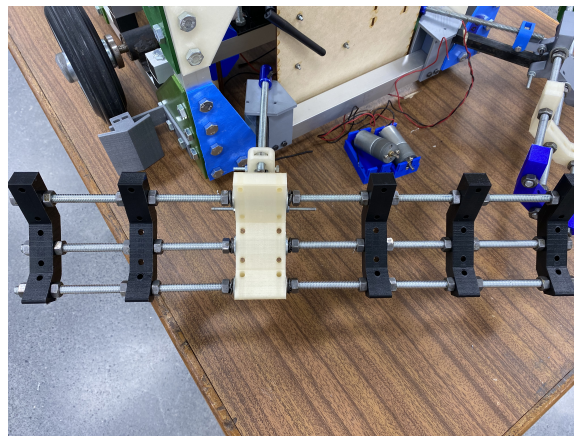


Figura 29: Sistema utilizando varilla 8mm

## 8.2. Rediseño de soportes verticales

Luego de intentos en impresiones de PLA en 3D se entendió que la forma curva interna de los soportes verticales de la pala frontal sería un poco compleja de manufacturar con lámina. Por ello se decidió realizar un cambio radical al diseño de la pala frontal aplicando una curva del lado interno de la pala hecha por 3 ángulos rectos. Tras esa idea de cambio también surgió la necesidad de modificar el espesor del soporte vertical completo. Para ello se modificó a un espesor de 16 mm permitiéndole a la varilla atravesarlo sin problema y darle espacio suficiente a las tuercas sin salir al borde exterior e interior de la misma. A su vez se realizaron modificaciones a las orejas que están unidas a la varilla cuadrada de soporte y al sistema retraible de las palas. Agregándole únicamente un perfil con mayor espesor, del mismo ancho que el soporte principal de 45 mm.

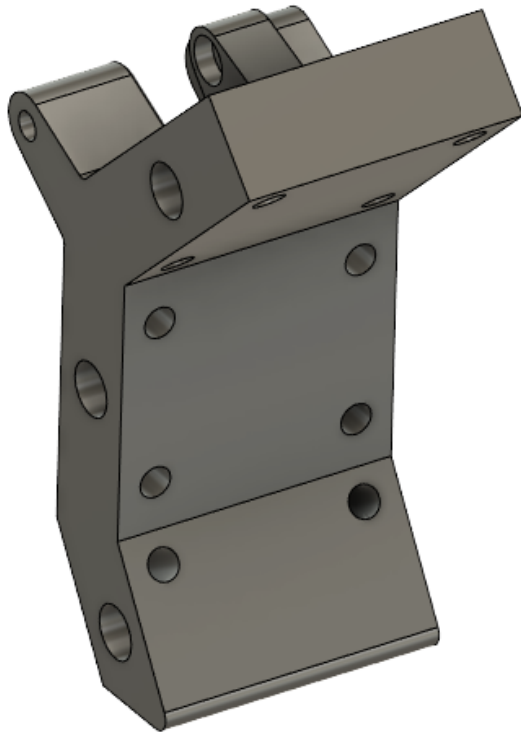


Figura 30: Nuevo rediseño en soporte central de pala frontal

Luego de modificar el soporte central anteriormente descrito, se dio a la necesidad de modificar también los soportes laterales. Teniendo un diseño muy parecido al central con los mismos tres agujeros laterales y pequeños agujeros en las caras planas frontales para sostener las placas metálicas. A pesar de tener un diseño parecido, las orejas por razones obvias se eliminaron, dado que dichas piezas proveen únicamente soporte y rigidez a la pala frontal. A su vez se redujo el ancho de las mismas a tan solo de 20 mm siendo una impresión en 3D también con material de PLA con 3 perímetros y un infill de 30 %. A continuaciones se muestra no solo el diseño en computadora sino que también la impresión en físico.

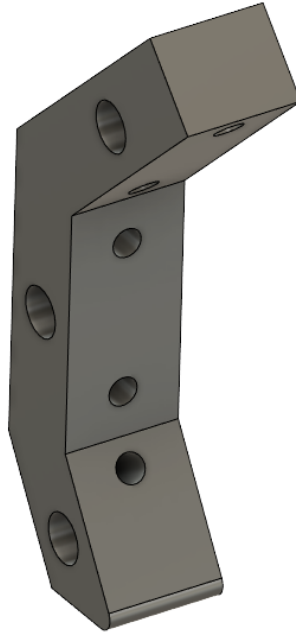


Figura 31: Nuevo rediseño en soportes adyacentes a soporte central



Figura 32: Rediseño de soporte en físico

### 8.3. Rediseño de sistema retraible de pala frontal

A pesar de un funcionamiento prometedor del sistema que se había preparado para la pala frontal, no fue del todo como se esperaba y por ello se decidió realizar una serie de cambios. Con la finalidad de comprender de mejor forma se pueden referir a la sección 8, donde se explica el diseño base que se tenía para el robot.

El sistema de la pala frontal que presento gran funcionamiento de forma digital y parecía no presentar mayor problema en su manufactura, resultó siendo complicado de construir. Siendo un sistema de un tamaño pequeño y no utilizando maquinaria de precisión como una CNC provocó complicaciones en su creación. Dado que la fabricación con las herramientas a disposición fue difícil se optó por re-diseñar la pieza y buscar otro método de manufactura.



Figura 33: Prueba de sistema de pala frontal de metal

Presentado un sistema por un lado idéntico con un diseño distinto, en el cual no solo se modifica el diseño como tal, como se puede ver en la Figura 34, sino que el cambio más grande es el material del cual se hará en esta ocasión. Con la finalidad de comprobar que el material es lo suficientemente capaz de soportar el movimiento del sistema, así como el ambiente al cual se expondrá. El nuevo diseño consiste en la misma base en la cual se utilizó una varilla roscada donde se desplaza una tuerca con el movimiento giratorio que el motor le dará a la varilla, enroscando y desenroscando la tuerca provocando un movimiento de atrás para adelante. Sin embargo la estructura se había ideado para ser manufacturada de metal, lo cual tras pruebas de manufactura resulto siendo complicado. Sin embargo la razón principal fue el requerir una alta precisión en el tamaño de los eslabones y de la posición de la tuerca respecto al eslabón adyacente que debiese ser soldado.

En el nuevo diseño del sistema retraible se modificó el compartimento y los eslabones adyacentes a la tuerca, que por razones bastante intuitivas, la tuerca es el único elemento del sistema que no es una impresión en 3D del sistema. En lo que cabe, se realizaron los

eslabones, que están anexos a la costilla de la pala y a los otros medios eslabones que sostienen la tuerca, de impresión en 3D con PLA. De igual forma el pequeño compartimento que alberga la tuerca suspendiéndola precisamente a la altura requerida para encajar con la varilla roscada y así cumplir el propósito del sistema retraible. El sistema y sus funciones seguirán siendo las mismas con un diseño de manufactura y materiales distintos que pueden observarse a continuación.

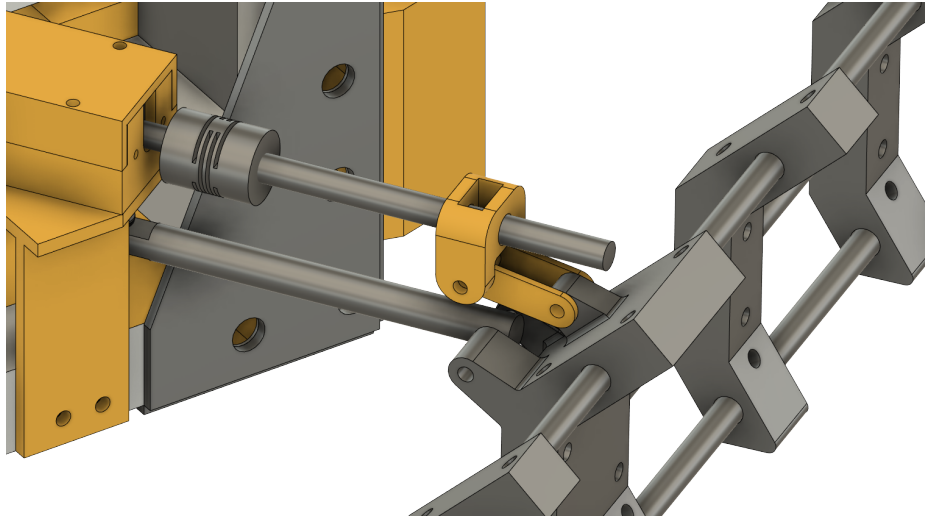


Figura 34: Rediseño de sistema de pala frontal PLA



Figura 35: Impresión en PLA del sistema de pala frontal

## 8.4. Prueba de esfuerzos de pala frontal

Se realizó una simulación de esfuerzos de la pala frontal en el programa Autodesk Fusion 360. En el cual se optó por la opción de un análisis estático para representar la fuerza que se le aplica a la pala por parte del café. Dicha simulación se realizó aplicándole un vector de fuerza a un ángulo de  $30^\circ$ , por la forma del diseño de la pala que puede verse en la Figura 28.

Para obtener un valor de fuerza aplicada por café se realizó el siguiente análisis a la pala frontal. Inicialmente se obtuvo medidas de la pala más grande, tales como las que se ven en la Figura 36, la Figura 37 y la Figura 38.



Figura 36: Ancho de pala frontal física



Figura 37: Profundidad de pala frontal física

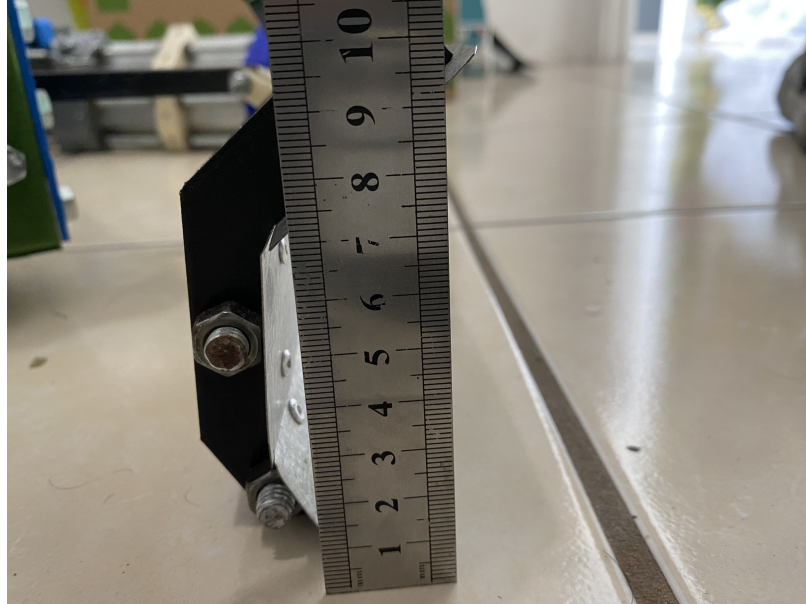


Figura 38: Altura de pala frontal física

Para simplificar el análisis se asumió un rectángulo con las medidas de la pala frontal, como el de la Figura 42, y tomando las dimensiones vistas en la Figura 36, la Figura 37 y la Figura 38, se obtuvo un modelo de un rectángulo tridimensional del frente de la pala. Tras obtener dicha figura, se realizó un cálculo con una caja que permitió obtener un promedio de volumen de granos de café. Las dimensiones de la caja se pueden observar en la Figura 39 y la Figura 40, las cuales son necesarias para tener un punto de referencia del volumen que se desea obtener del café.



Figura 39: Ancho de la caja para obtener volumen de café



Figura 40: Profundidad de la caja para obtener volumen de café

Con ayuda de las dimensiones anteriormente descritas y llenando la caja a la altura prevista de la pala, como en la Figura 38, se puede obtener el peso específico del café que entre en dichas dimensiones. Con el café dentro de la caja de la Figura 41, se obtuvo un peso neto de 0.3 lbs, el cual se utilizó para obtener un valor promedio de café que puede acumularse frente a la pala de 1.6 libras, como puede analizarse en la Figura 42. Por fines prácticos se asumieron 2.2 libras para facilitar transformaciones por ser equivalente a 1 kg. Exagerando 10 veces el valor obtenido en kilogramos aplicándole un gran margen de error y transformándolo a newtons, se obtuvo un valor de 98 N de fuerza aplicada a cada una de las palas.

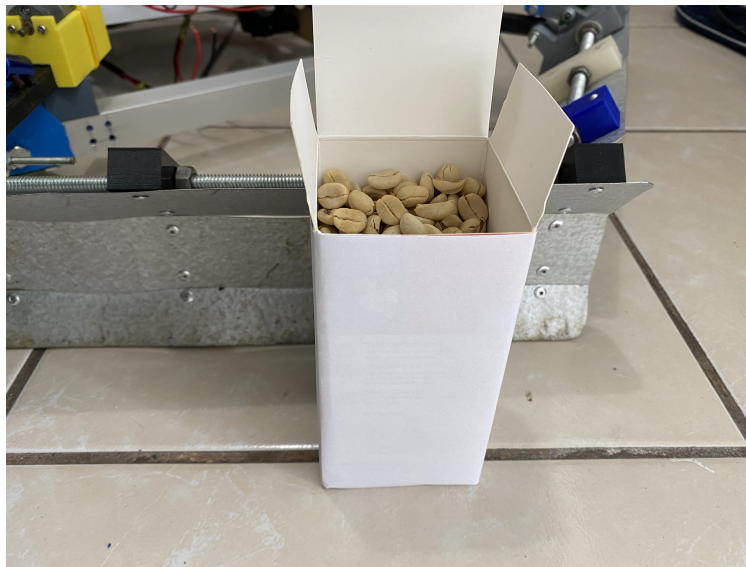


Figura 41: Caja con café para obtener volumen de café

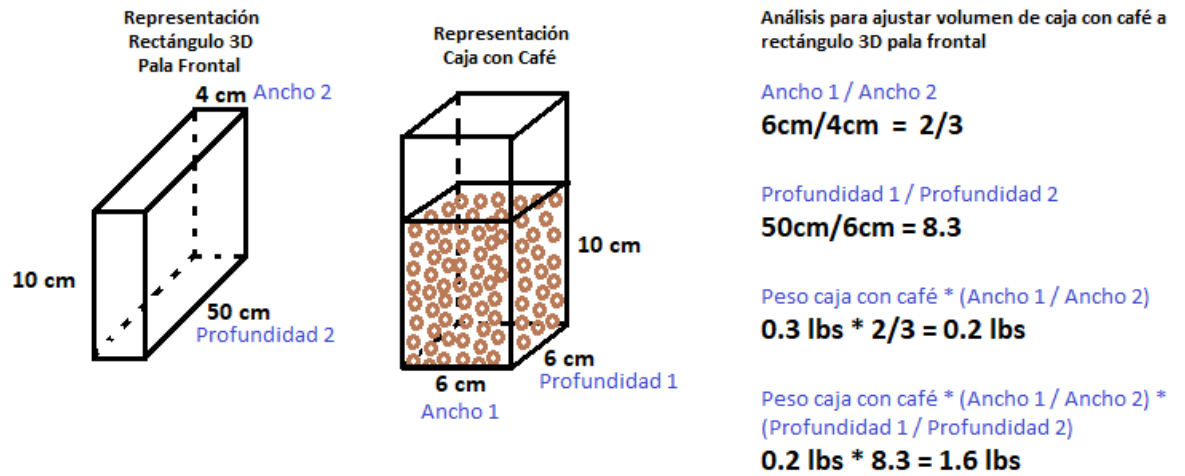


Figura 42: Análisis de peso frente a pala

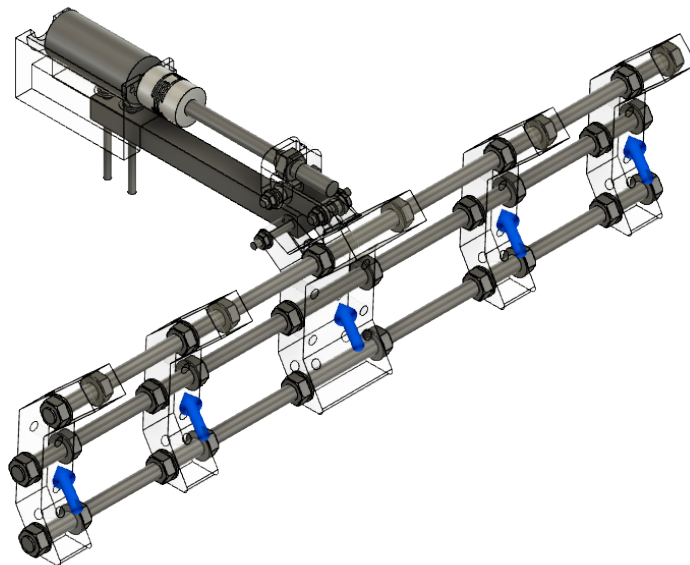


Figura 43: Aplicación de fuerza en prueba digital Fusion 360

Con base en la simulación realizada en Fusion 360, se obtuvo que el sistema y el diseño soportará la fuerza de 98 N aplicadas. El estrés máximo que se presenta dentro de la simulación es de 11469 psi y el que soporta la barra roscada grado B7 según su ficha técnica es de 125 kpsi. Por dichos resultados es posible decir que el diseño sí cumple con la fuerza deseada y se puede observar en la Figura 44.

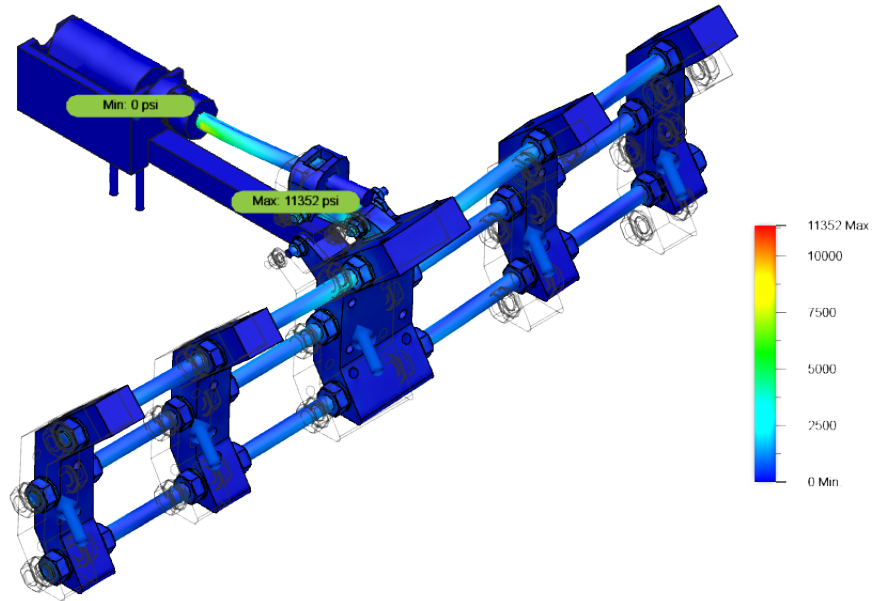


Figura 44: Resultado de simulación de máximo estrés pala frontal

Por otro lado para corroborar la prueba del simulador de Fusion 360, el programa te aporta una alerta si tu diseño tiene una gran oportunidad de soportar la fuerza aplicada. Para ello aplica un factor de seguridad con el cual determina si el diseño tiene riesgo a fallar. Como se puede observar en la Figura 45 el factor de seguridad es superior a 3 y por ello la simulación nos asegura que el diseño con la fuerza de 98 N no será afectada por fracturas o flexiones permanentes.

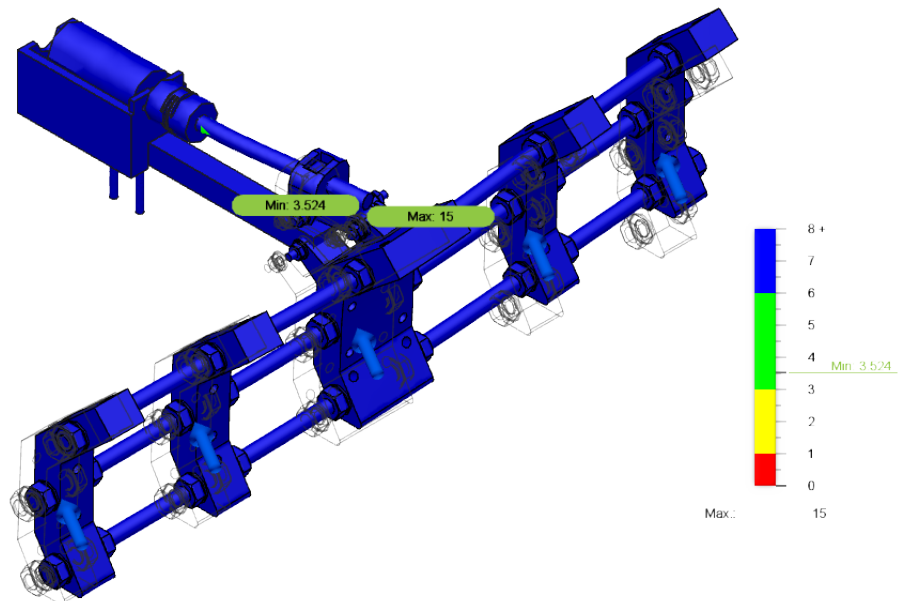


Figura 45: Resultado de simulación de factor de seguridad pala frontal

Por otro lado es posible también observar el desplazamiento que sufre la pala frontal al momento de aplicar la fuerza. Observando la Figura 46 es posible apreciar que el movimiento según la cifra máxima es de tan solo 0.2917 mm, otro dato que da una idea de la razón por la cual el diseño cumple.

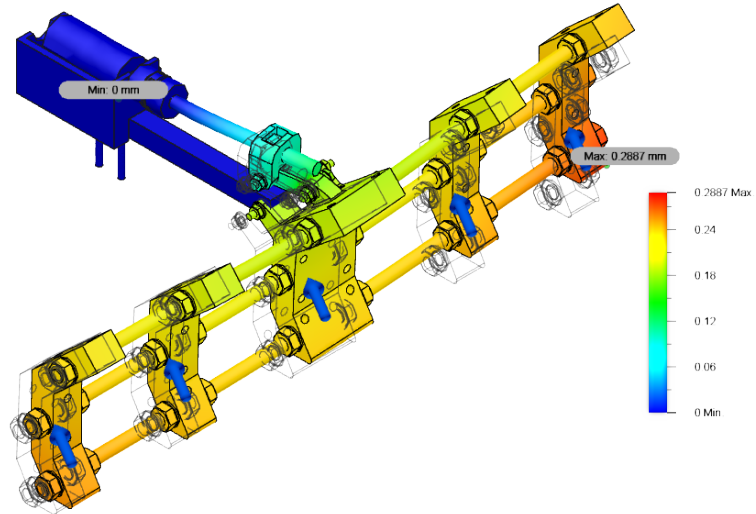


Figura 46: Resultado de simulación de desplazamiento pala frontal

Posteriormente se realizaron todas las impresiones en PLA, cortes de las barras rascadas y se ensambló la pala en su totalidad. Mostrando un aspecto prometedor y con gran rigidez con las pruebas de esfuerzo en físico se obtuvo un resultado positivo y resistió acarrear café sin problema. Un momento de la prueba en físico de la pala se pueden observar en la Figura 47.



Figura 47: Prueba con café del rediseño de pala frontal



---

## Rediseño de la estructura

---

Se decidió rediseñar la estructura completa de tubos del robot en la segunda fase por haber presentado dificultades en su manufactura. Dado que el material utilizado, que es aluminio, presentó problemas para ser soldado y se tornaba costoso realizarlo profesionalmente. Por dichos resultados presentados del primer prototipo se rediseño la estructura para cambiar completamente el método de unión de tubos. Utilizando el mismo tipo de material, tubo de aluminio, por ser liviano y ser muy rígido, algo aprendido del primer prototipo.

Para la estructura sin soldadura se diseñaron platinas en forma geométrica de 3 milímetros de espesor que permitieron por medio de tornillos M8x20 ser sujetadas. Como se observa en la Figura 48, teniendo una forma de triángulo con agujeros es una pieza simple pero que provee rigidez y permite la unión de tubos sin soldadura.

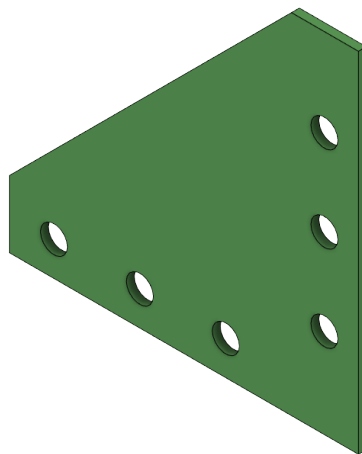


Figura 48: Diseño de platina para juntas

Utilizando un método innovador se rellenaron los tubos, de 1x1 pulgada, de pequeños rectángulos a la medida. Como puede observarse en la Figura 49, los rellenos no son simples impresiones en 3D, sino que poseen pequeños espacios donde encajan tuercas M8, M6 y M4. Se realizaron pequeñas pruebas de impresión en PLA para obtener el tamaño correcto no solo de para las dimensiones del relleno, sino que también las dimensiones de las tuercas del relleno.

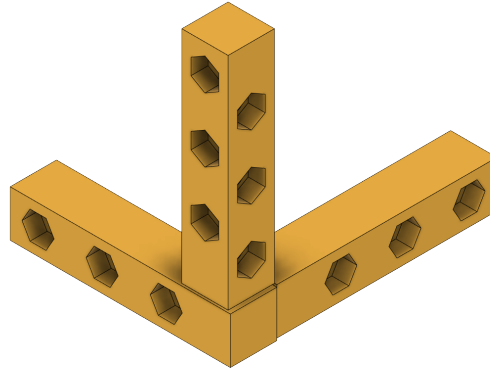


Figura 49: Sistema impreso en 3D relleno de tubo y acuñador de tuercas

Dicho diseño permitió someter la tuerca a un espacio en específico en cuanto a su silueta hexagonal. Lo que resultó eliminando el uso de una contra-llave, por restringir el giro de la tuerca, para unir las platinas y el tubo con un tornillo. Además se ideó el relleno del tubo como soporte interno, que permitió ejercer presión con el tornillo al ser apretado y no causar deformaciones del tubo. Dado que no todo el tubo necesitaba soportes internos, los rellenos abarcan únicamente el espacio necesario para soportar sus propios tornillos.

Se muestra el relleno en la Figura 49 que se introduce dentro del tubo, tal y como se observa en la Figura 50. Luego únicamente se posicionan las platinas con tornillos en la parte exterior, como se muestra en la Figura 51.

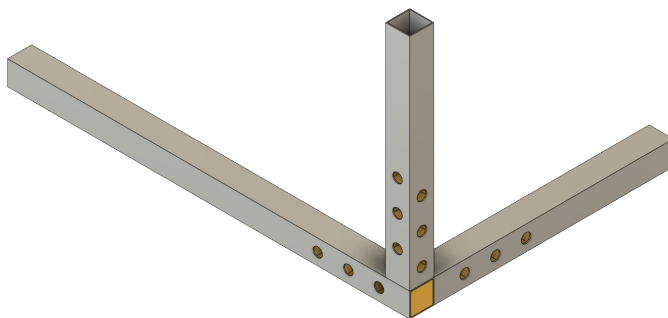


Figura 50: Estructura de únicamente tubos con rellenos impresos

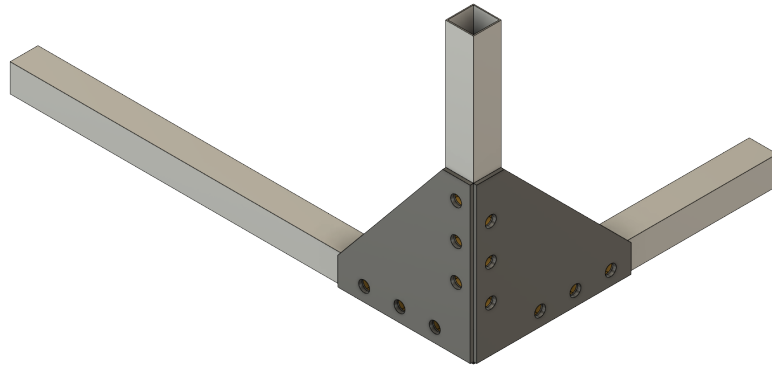


Figura 51: Rediseño de uniones de tubos cuadrados

Siendo utilizada la junta anteriormente descrita en cada una de las esquinas del cuerpo del robot, con ligeras modificaciones como puede observarse en la Figura 52. Posteriormente realizadas pruebas de esfuerzo al diseño de las platinas, tanto como en simulación que como en físico. Para ello se optó por crear una serie de simulaciones, vistas en la sección 9.3, y luego se realizaron pruebas físicas, vistas en la sección 9.4. Resultados que se pueden observar en cada una de las secciones, que permitieron identificar el material a utilizar y comprobar la viabilidad del diseño. Con el fin de obtener una estructura rígida y capaz de moverse con estabilidad y poder cumplir con el propósito del acarreo del café con sus palas frontales, como se observa el robot construido en la Figura 53.

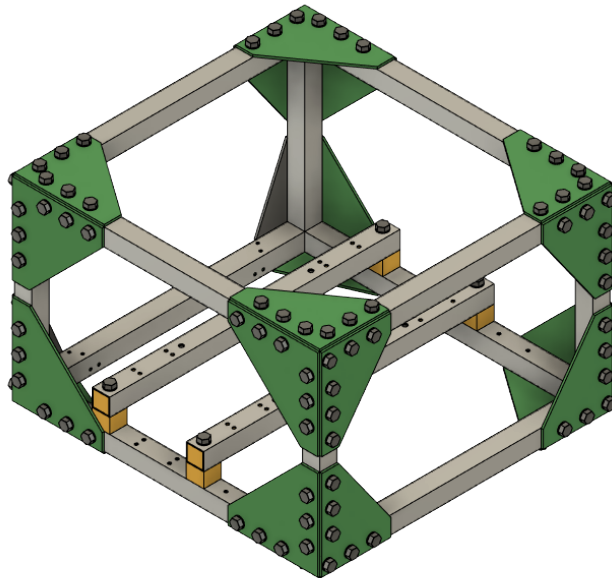


Figura 52: Diseño de estructura de tubos con platinas

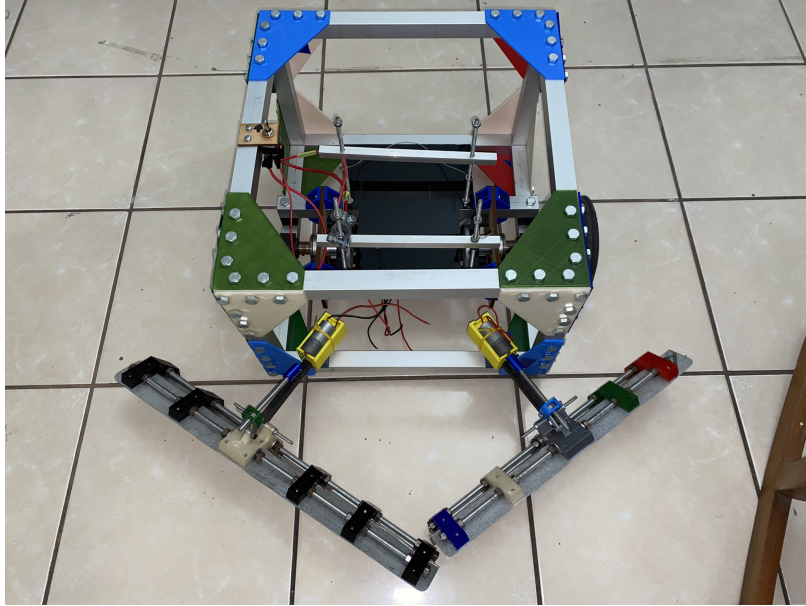


Figura 53: Robot construido con el rediseño de estructura

Para la estructura interna de las llantas laterales se mejoró rediseñando la idea original del primer prototipo. Para ello se ideó que el soporte de los motores fuese una sola pieza rígida sostenida en un espacio reducido. Con el fin de evitar movimientos aleatorio de las llantas laterales, que se presentaron en el primer prototipo El primer modelo del rediseño del soporte de las llantas laterales fue ajustado a la nueva estructura ya diseñada tras realizar una prueba, vista en la sección 9.2, que resultó siendo positiva.

Para poder obtener un lugar reducido donde asegurar el cargador de las llantas laterales, se colocaron los soportes de tubo de la batería de forma horizontal, como se ve en la Figura 54. Permittiéndonos asegurar con rigidez el soporte de 6 mm cortado en MDF en su lugar, que puede observarse en la Figura 55.

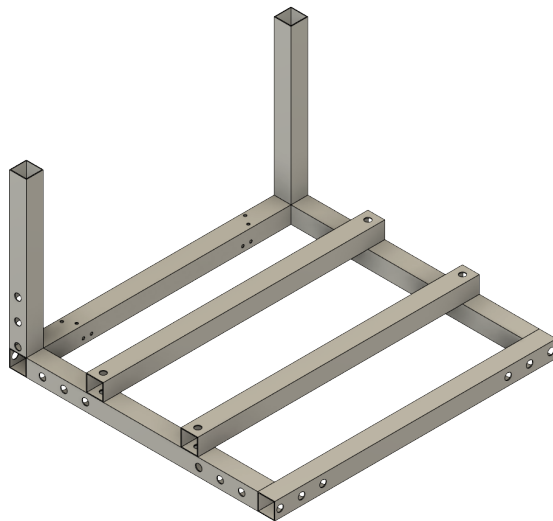


Figura 54: Rediseño de base interna inferior

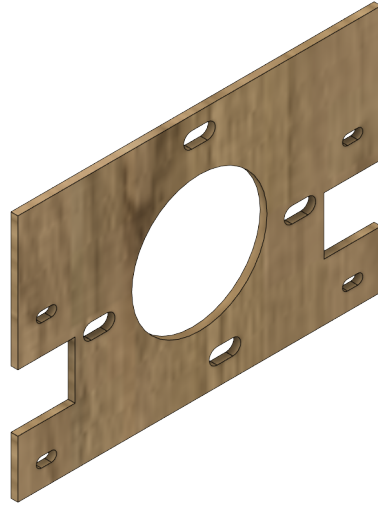


Figura 55: Rediseño de soporte de motor llantas laterales

Luego del implemento del nuevo soporte únicamente se le aplicaron espaciadores a los tornillos del motor para evitar un defecto observado en el primer prototipo. Lo que provocaba también un des-balance en el giro del motor, solucionándolo con unos espaciadores de 10 mm impresos en PLA, los cuales se pueden ver en la siguiente Figura 56

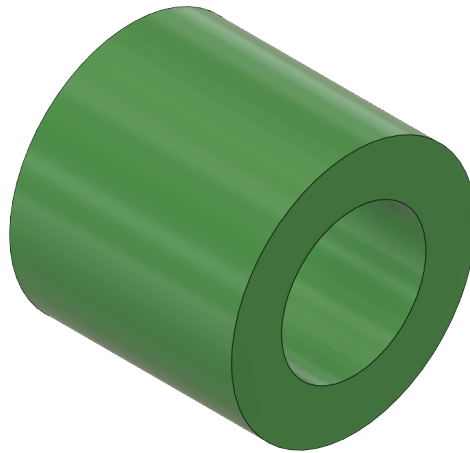


Figura 56: Espaciadores de 10 mm para ensamble motor

Con lo observado en el primer prototipo, se diseñó una escuadra impresa en PLA, vista en la Figura 57, capaz de sostener el soporte cortado en MDF del robot con los tubos de soporte interno. Siendo 8 puntos de soporte atornillados a los tubos internos directamente, vistos en la Figura 58, que proporcionan gran rigidez a cada una de las llantas laterales.

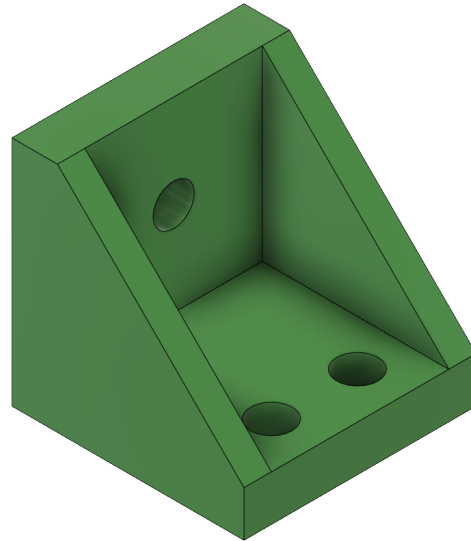


Figura 57: Escuadra fijadora soporte de motor lateral

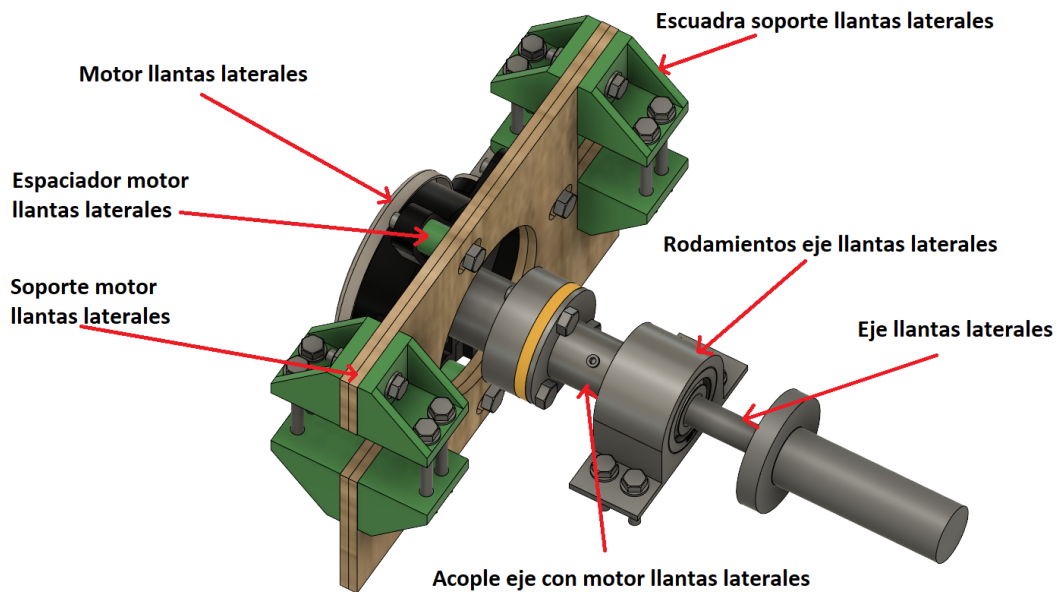


Figura 58: Ensamble total de llanta lateral con soporte

Tras el rediseño del soporte de llantas laterales, el reajuste de los tubos de soporte interno y el rediseño de la estructura de tubos en general se ensambló una nueva estructura. Dicha estructura presentó una gran rigidez durante las pruebas realizadas manteniendo su forma firme, como puede observarse en la Figura 47.



Figura 59: Ensamble de llanta en físico con soporte

## 9.1. Prueba de esfuerzos del soporte de llantas laterales

Con la finalidad de probar el nuevo diseño de la estructura de soporte de las llantas laterales que se menciona en la sección 9 se realizó una simulación en Fusion 360. Para lograr dicha simulación se tuvo que estimar una fuerza aplicada en las escuadras de soporte, Figura 58, representando el peso que cargarían las mismas. Obteniendo el peso de la batería de forma física, como se ve en la Figura 60, que resultó siendo de 18.4 lbs. Agregando el poco peso extra de los componentes electrónicos y con fines de sobrevalorar y tener un mejor margen de error, se tomó el peso como si fuera 22 lbs que es equivalente a 10 kg.



Figura 60: Fuerzas aplicadas en prueba de esfuerzo llantas laterales

Con los valores del peso únicamente bastó de realizar la transformación de kilogramos a newtons. Lo que llevó a obtener que el peso que cargaría cada uno de los lados de las llantas laterales es de 49 Newtons, por estar las llantas simétricamente colocadas. Por ello el peso total de 98 Newtons se divide en 2 y cada lado, tanto el derecho como el izquierdo, cargan 49 Newtons. Con la finalidad de sobrevalorar el peso, se asumió que el peso que siente cada uno de los lados es del total del peso de 98 Newtons. Dentro de la simulación cada una de las escuadras del soporte de las llantas laterales carga 49 Newtons, como se muestra en la Figura 61.

Para obtener seguridad de la simulación fueron tres distintos indicadores de la misma las que nos confirmó que el diseño cumpliría su propósito. El primero es el factor de seguridad que indicando un número mayor a 3, es cuando el simulador garantiza el funcionamiento debido, sin fracturas y sin deformaciones permanentes. Dicho resultado puede observarse en la Figura 62

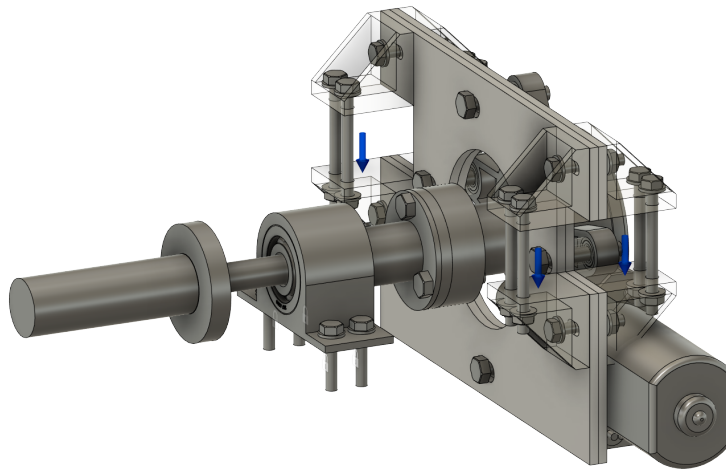


Figura 61: Fuerzas aplicadas en prueba de esfuerzo llantas laterales

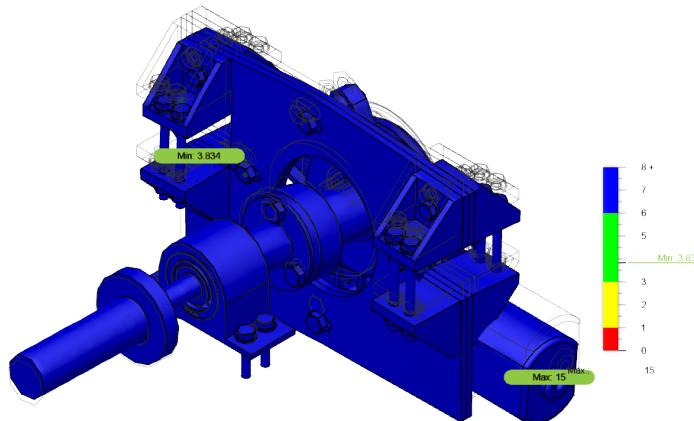


Figura 62: Simulación del factor de seguridad para llantas laterales

Como segunda prueba en la simulación se obtuvo el estrés máximo, que presenta número realmente bajo de 4703 psi ubicada sobre el eje de la llanta, el cual es de acero y en Guatemala el acero más común vendido no baja de 70 000 psi de tensión máxima. Por lo tanto se puede asegurar que la pieza no sufrirá algún tipo de fractura por parte del material por el peso aplicado al sistema, se puede observar en la Figura 63.

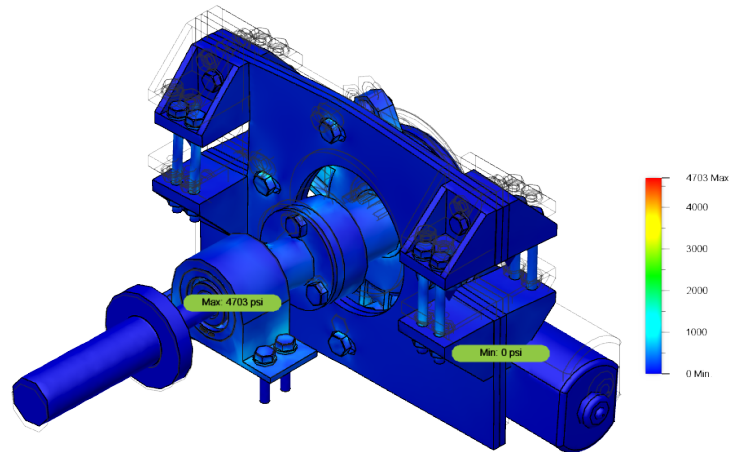


Figura 63: Simulación de estrés para llantas laterales

Para efectuar una simulación extra se decidió analizar el desplazamiento del diseño al aplicar la fuerza de 98 N. La prueba de desplazamiento resultó teniendo mucha lógica dado que según la simulación el máximo desplazamiento será de tan solo 0.03091 mm. Dicho resultado nos da el indicativo que el sistema casi no se moverá y por ende otra muestra que el diseño cumple para su propósito, se puede observar en la Figura 64

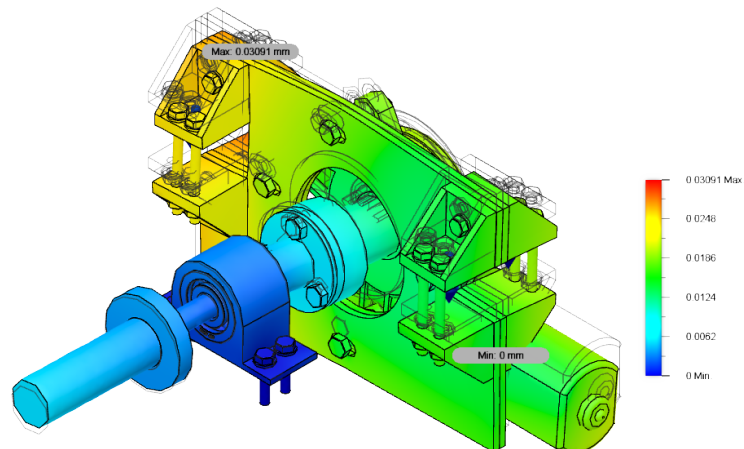


Figura 64: Simulación de desplazamiento para llantas laterales

## 9.2. Rigidez de estructura de motores laterales

Utilizando la estructura del primer prototipo e implementando la nueva idea de diseño de soporte de llantas laterales se realizó una prueba en físico a los motores de llantas laterales. El fin de la prueba era comprobar la capacidad de los motores laterales de las llantas, de tener la capacidad de acarrear granos de café. A su vez un segundo propósito de la prueba fue analizar la nueva idea del soporte de las llantas laterales, no como idea final pero como primer prototipo del rediseño.

Se implementó una pala frontal horizontal temporal, con el fin de analizar la máxima fuerza soportada por los motores de las llantas. Como se puede observar en la Figura 65 y la Figura 66 donde se muestra la pala horizontal temporal y la idea base del nuevo diseño de soporte de motores.



Figura 65: Rediseño para prueba pala frontal



Figura 66: Rediseño para prueba de soporte de motores

Realizando una prueba directa con granos de café, se puede concluir que el motor de las llantas es completamente capaz de acarrear café incluso siendo sometida a un máximo de la fuerza aplicada a la misma. Por otro lado se logró comprobar también la funcionalidad de la nueva idea del diseño de soporte de motores laterales. Dando un resultado positivo la prueba sirvió para proseguir con las ideas planteadas del rediseño y para comprobar la reutilización de los motores de las llantas. Dicha prueba puede ser observada en la Figura 67, donde se encuentra empujando los granos de café.



Figura 67: Prueba de motores y su nuevo diseño de soporte

### 9.3. Prueba de esfuerzos de junta de tubos

Previa a realizar una prueba de forma física se realizó una simulación de esfuerzos digital para lograr conocer la capacidad de carga de la nueva estructura diseñada únicamente con platinas, tubos y tornillos. Para ello se aisló un segmento de una junta de tubos en Fusion 360, como puede observarse en la Figura 68.

Para realizar la prueba se tuvo que estimar el peso que cada uno de los tubos iba a sentir y para ello se obtuvo el peso neto de la batería, los electrónicos, como se menciona en la sección 9.1, agregándole en este caso el peso de 8 tubos de aluminio. Lo cual resultó siendo casi insignificantes con tan solo 1.8 libras de aluminio y se decidió aplicar nuevamente 98 N de fuerza. A pesar que cada una de las esquinas inferiores sienten el mismo esfuerzo de 98 N y por ello dentro de la prueba el peso verdadero debería de ser 24.5 N, se sobrevaloró y se utilizó 98 N. Con la finalidad de sobrevalorar los valores de la simulación y así evitar correr el riesgo de obtener fallas, por cuestiones de tiempo no solo de rediseño sino de manufactura de las piezas.

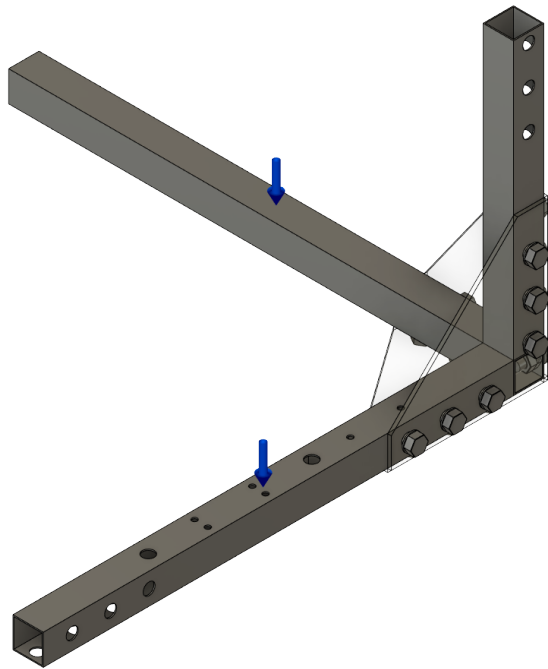


Figura 68: Vectores de fuerza aplicados a prueba de junta de tubos

Dentro de la simulación la fuerza fue aplicada directamente en los tubos, como puede observarse en la Figura 68 con vectores de color azul. Pro-siguiente en la prueba se tomaron en cuenta tres distintos factores para concluir el éxito del diseño. El primer factor conocido como factor de seguridad, el cual el simulador indicó que era más que seguro el diseño, obteniendo un factor de seguridad de 7.764. Dicho valor siendo muy alto, se puede observar en la Figura 69 nos dio el indicativo que la estructura esta sobre-diseñada, siendo capaz de soportar mucho más peso del previamente pensado.

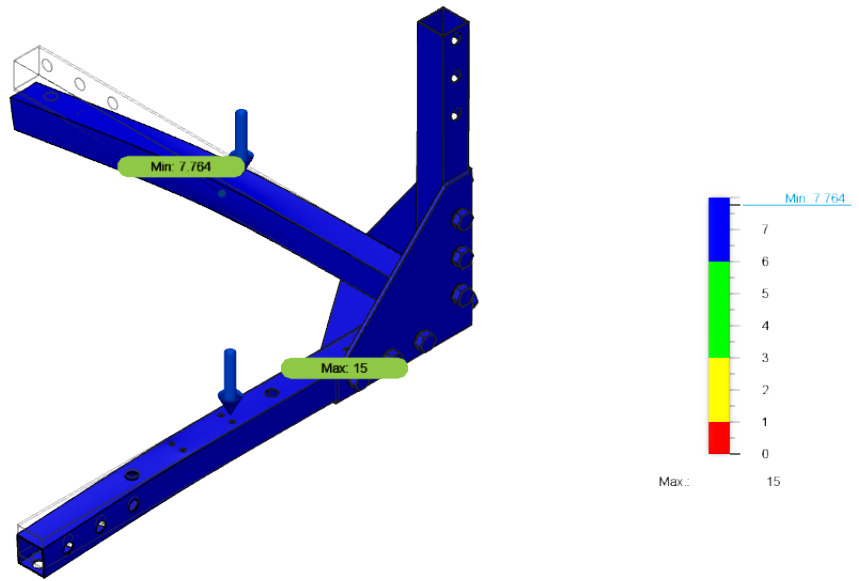


Figura 69: Simulación del factor de seguridad de junta de tubos

Posteriormente se analizó el resultado de la simulación de estrés dentro del sistema. Obteniendo un valor de estrés máximo de tan solo 5152 psi y sabiendo que el del aluminio es de 40 000 psi como mínimo, nos aseguró que la estructura sería capaz de aguantar la carga aplicada sobrevalorada. Como puede observarse en la Figura 70 los puntos críticos del sistema son aquellas secciones del tubo más vulnerables, siendo el punto medio de ellos.

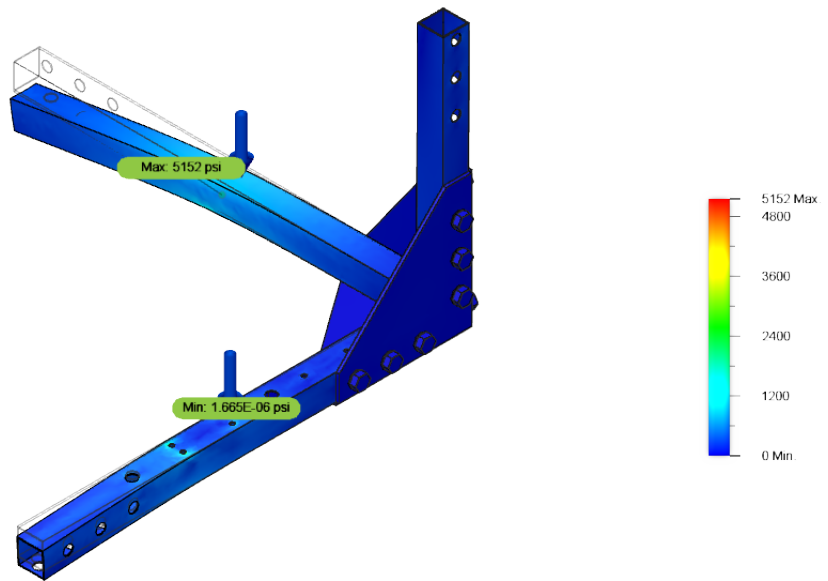


Figura 70: Simulación de estrés de junta de tubos

Como último análisis de la simulación se tomó el desplazamiento del sistema a la hora de aplicar la carga sobre los tubos dentro de la simulación. Siendo un desplazamiento tan pequeño de 0.04561 mm, como puede observarse en la Figura 71, nos dio el último indicativo que el sistema soportaría la carga previamente pensada.

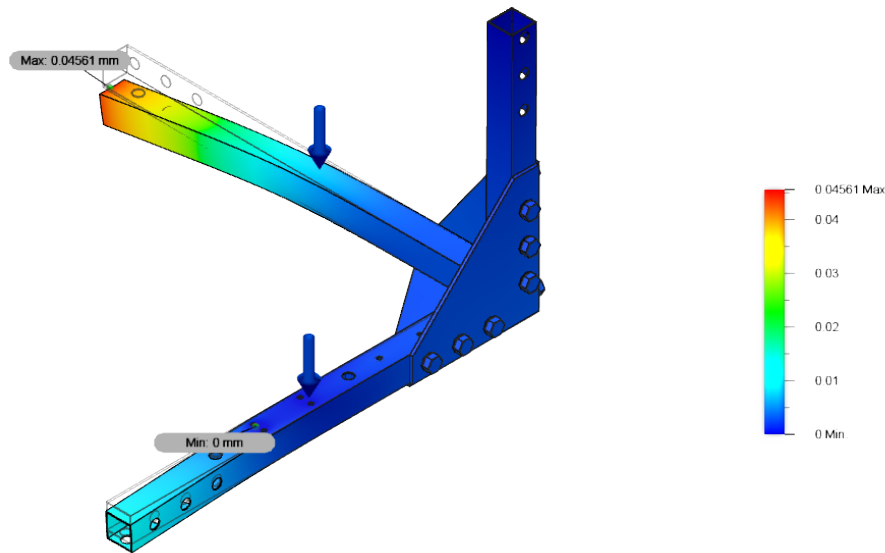


Figura 71: Simulación de desplazamiento de junta de tubos

#### 9.4. Rigidez del material de junta de tubos

Para realizar la prueba de resistencia de esfuerzo del diseño de juntas de la estructura, se construyó un modelo con impresiones en 3D de PLA, tubos de aluminio 1x1 pulgadas cuadrado con espesor de 1 mm y una platina de 3 mm de espesor. Para obtener la carga que se utilizaría para la prueba se utilizó el método descrito en la sección 9.3 y la sección 9.1, donde se utiliza 98 N que es equivalente a 22 lbs. Aplicándole una carga total de 21.1 lbs, el peso de una caja de herramientas visto en la Figura 72, a la junta de tubos durante la prueba.

Cada prueba consistió en definir el material de las platinas, los cuales pueden observarse en la Figura 73 con acero, la Figura 74 con PLA y la Figura 75 con MDF, y la capacidad de carga del tubo de aluminio. Para la prueba se sostuvo la junta de tubos a una viga para que a cada una de las platinas se le aplicara justo al límite del tubo, 400 mm de distancia, la carga total de 21.1 lbs. Con resultados positivos para cada uno de los materiales de platina, el MDF fue el único que presentó una flexión extraña y aplicándole un poco de fuerza manualmente terminó por fracturarse. Por lo contrario el acero y el PLA se mantuvieron rígidos, incluso aplicando más fuerza manualmente. Por lo tanto se decidió optar por platinas impresas en PLA, por el factor tiempo que influenciaba bastante en la decisión y a su vez que es más liviano y con mayor precisión en los agujeros. Utilizando una impresión con 5 perímetros, 30 % de infill, un patrón “cubic subdivision“ y 7 capas solidas en las platinas en PLA.



Figura 72: Carga para prueba de juntas

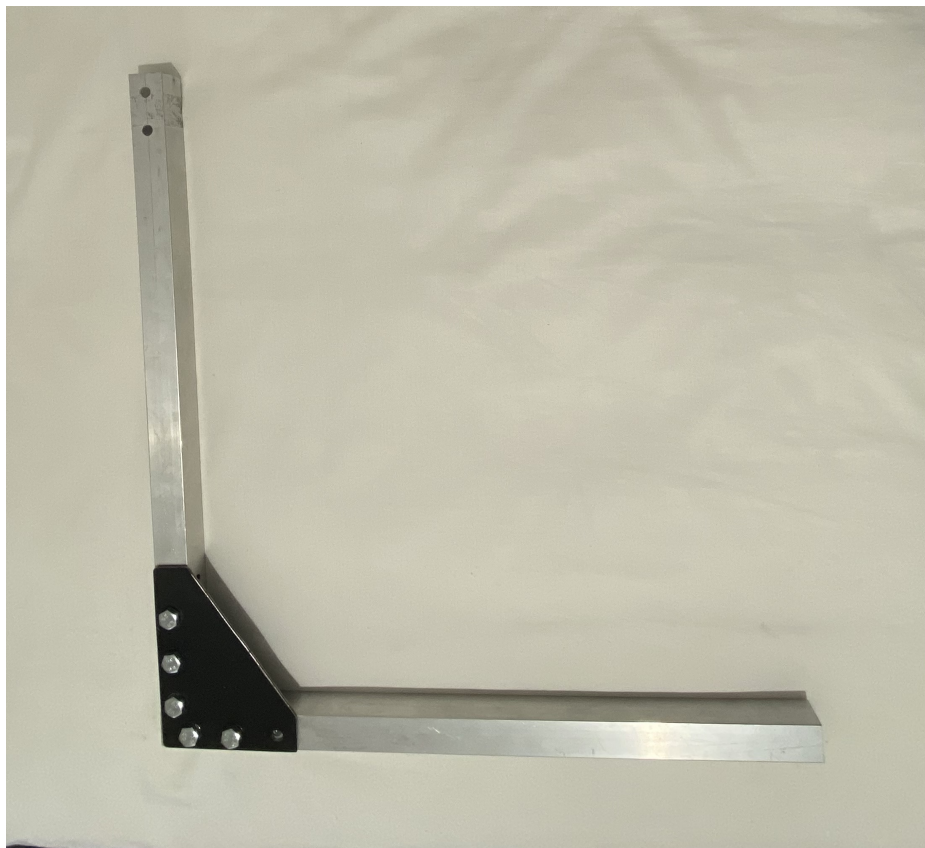


Figura 73: Prueba de resistencia de junta con platina de acero

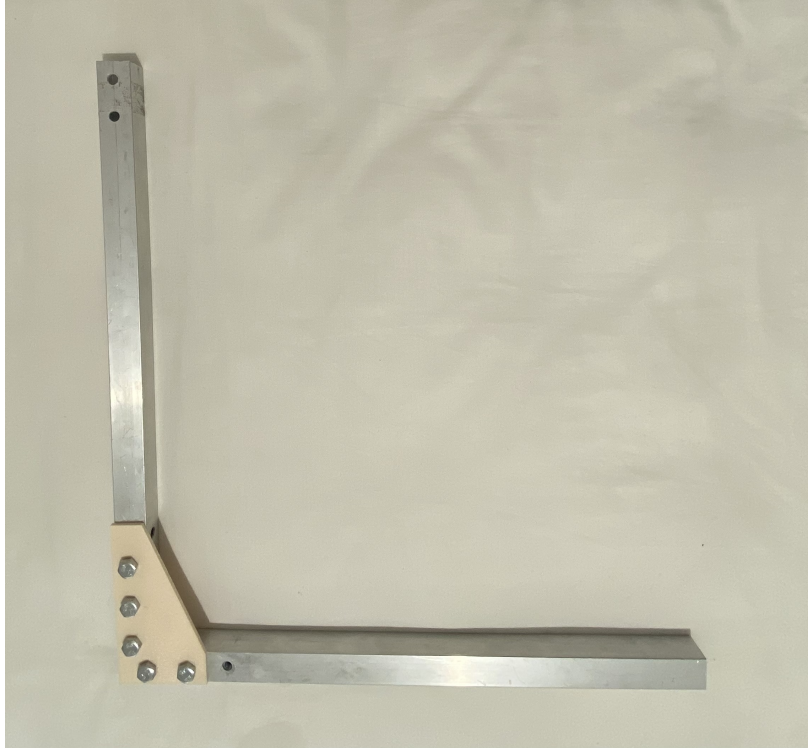


Figura 74: Prueba de resistencia de junta con platina de PLA

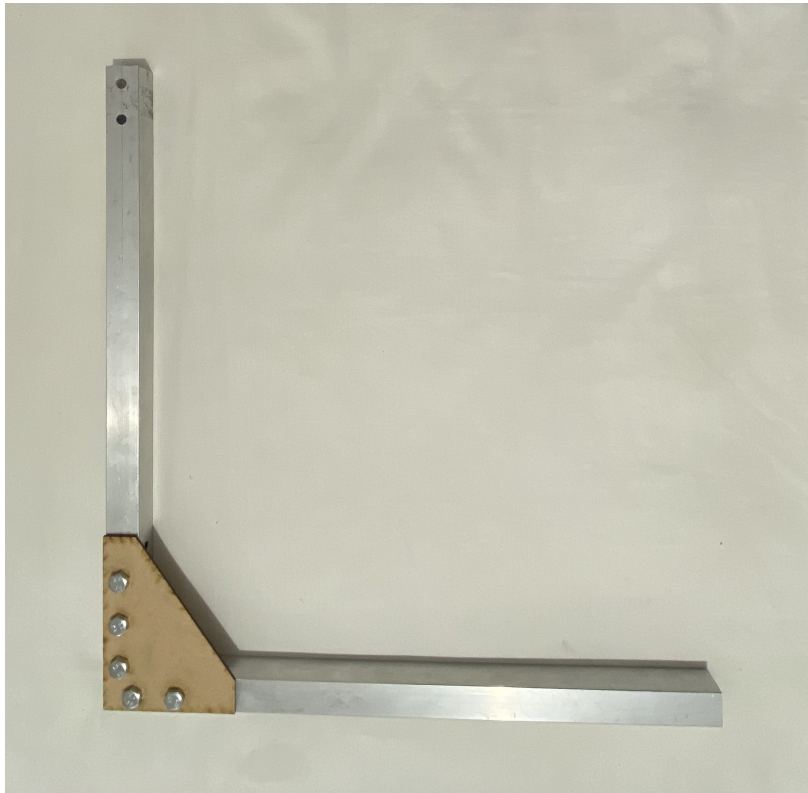


Figura 75: Prueba de resistencia de junta con platina de MDF

---

### Implementación de defensa de llantas

---

Como medida de prevención a cualquier residuo que logre de alguna forma sobrepasar las palas frontales se implementó una defensa propia a la llanta para prevenir el contacto con cualquier grano de café. Para su diseño se utilizó de modelo la forma de las palas frontales, más no fueron completamente idénticas. Dado que dichas defensas serán meramente estacionarias, es decir que no poseerán ningún tipo de movimiento, como el sistema retraible de la sección de Rediseño de la pala frontal 8.

Como se mencionó que las defensas son estacionarias ellas están atornilladas directamente con el tubo de aluminio a un costado sobre las patinas. El diseño que se utilizó fue el de una escuadra con dos agujeros M8 en una de las alas y en la otra otros dos agujeros M4 para la defensa. Dicho ensamble posee dos tornillos compartidos M8, originarios de las estructura de juntas con platinas. La distancia tan reducida del sistema fue pensada para asegurar repeler todo grano de café que pueda afectar el desplazamiento natural del robot. El diseño puede ser observado en la Figura 76, la Figura 77 y la Figura 78 a continuación.

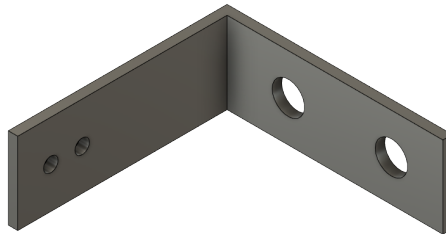


Figura 76: Escuadra de defensa de llantas laterales

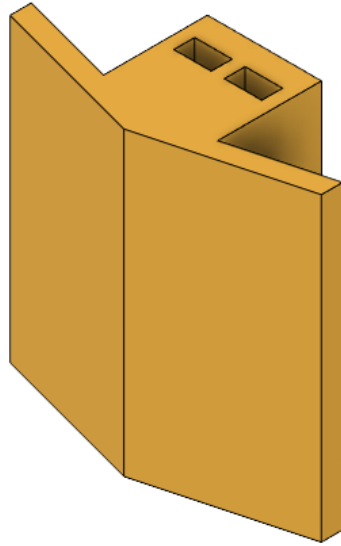


Figura 77: Defensa de llantas laterales

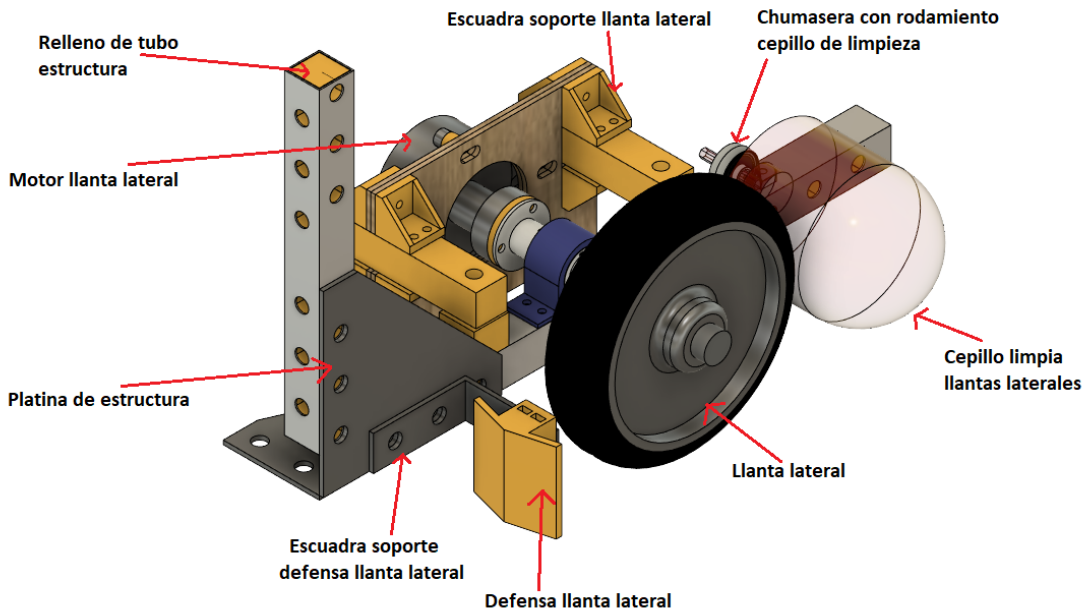


Figura 78: Defensa de llantas laterales ensamblada

Sin embargo dentro de su construcción se presentó una modificación que llevó a una reimpresión de las defensas, dado que al ser posicionadas estaban situadas al nivel del suelo y afectaba el movimiento del robot. Por ello se modificó el diseño, agregándole 3 mm de altura para elevar la defensa en el aire y evitar el contacto directo con el suelo como se observa en la Figura 79.



Figura 79: Defensa de llantas laterales ensamblada en robot

## 10.1. Prueba de defensa de llantas laterales

Se realizó la prueba física de la defensa y a pesar que en su construcción aparentaba poseer gran rigidez, concluyó no siendo. Teniendo un problema con el material utilizado para realizar la escuadra dado que resulto siendo un diseño inadecuado para una impresión en 3D. Dentro de la prueba la falla que tuvo fue una fractura de la escuadra por la mitad, como se puede observar en la Figura 80. El resultado de la prueba de la defensa concluyó en no poderlas poner en prueba por el corto tiempo que duraron unidas al robot. Por la ausencia de tiempo y por no ser un implemento de alta prioridad considerado por parte de la gente patrocinadora del proyecto no fueron probadas con anticipación.

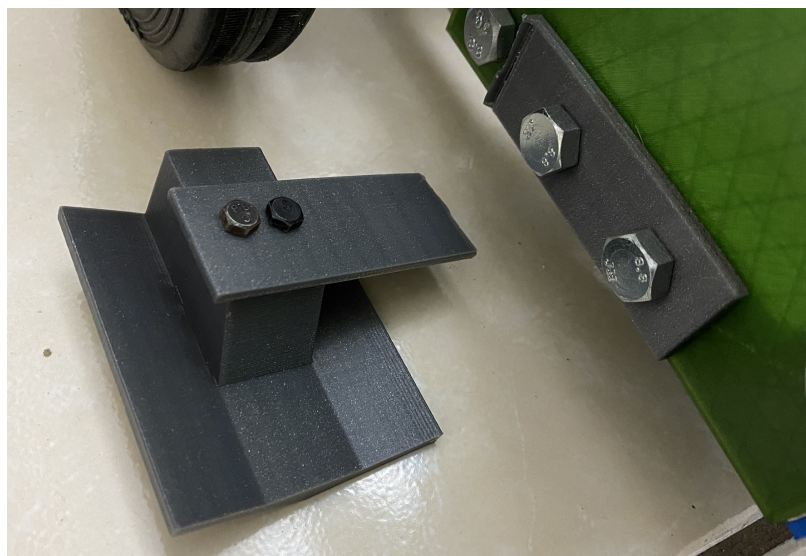


Figura 80: Fractura en del sistema de defensa de las llantas laterales



---

## Implementación de sistema de limpieza de llantas

---

Como método de limpieza para cada una de las llantas laterales se optó por implementar un cepillo que les pueda proporcionar una ayuda a eliminar la recolección de basura en ellas. Un detalle muy mencionado por los patrocinadores del proyecto que era el evitar la mezcla de clases de café por medio de las llantas. Inicialmente la idea fue un cepillo cilíndrico como los que poseen los robots inteligentes de limpieza de suelos de hogares. Sin embargo resultó siendo una idea con un costo alto y complicado de adquirir localmente, por ende se decidió una alternativa.

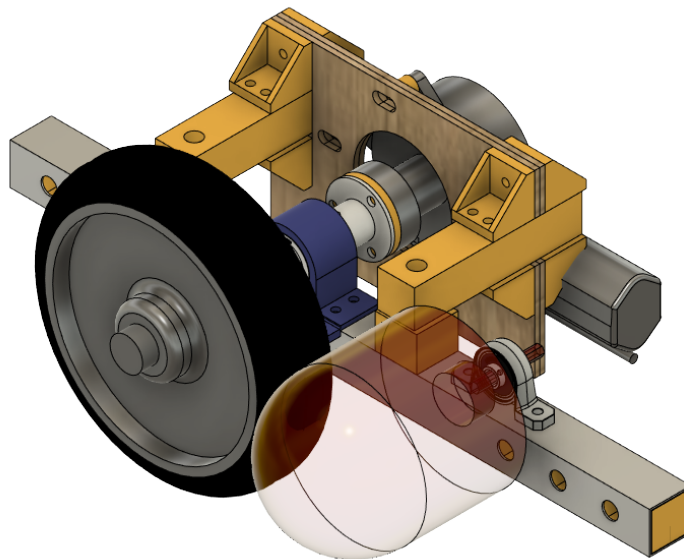


Figura 81: Diseño de ensamble de cepillo de limpieza

Para ello se utilizó un cepillo parecido a la idea original y con un costo mucho más bajo con la facilidad de adquirirlo localmente. Dicho cepillo tiene una figura semi-esférica cilíndrica, creado para ser utilizado en taladros para limpieza de llantas de automóviles. Para ser acomodado al robot se utilizó chumaseras de 25 mm a las cual el cepillo, por poseer un adaptador de taladro de 1/4 de pulgada, se introduce y se atornilla. El sistema del cepillo fue diseñado para ser colocado en la parte trasera de la llanta con la finalidad de mantener un contacto constante con ella. Por fines de limpieza del mismo cepillo se diseñó un sistema con un mecanismo fácil de ensamblar y desensamblar con la posibilidad del usuario de desmontarlo para limpiarlo, puede observarse en la Figura 81.

## CAPÍTULO 12

---

### Listado de piezas y costos

---

Dentro de las figuras 82 y 83, se puede encontrar el listado de cada una de las piezas utilizadas para la construcción del robot. Cada uno de los nombres que se encuentran en la lista, son los mismos con los que están guardados los planos de cada una de ellas. A su vez es el mismo nombre para cada uno de los archivos de las piezas modeladas en Autodesk Fusion 360. Cabe mencionar que también se puede observar una columna de cantidad, que representa la cantidad de veces que se utiliza la misma pieza para la construcción del robot.

## Listado de piezas de robot de café

No.	Nombre de piezas	Cantidad
1	AcopleMotor	2
2	Agarradera/Chuma	2
3	EjeLlantaLateral	2
4	EscuadraSoporteMotoresLaterales	16
5	EspaciadorMotorAcopleLlantasCostado	8
6	LlantasLaterales	2
7	MotorLaterallzquierdo	1
8	MotorLateralDerecho	1
9	RodamientosAgarradera	4
10	SoporteMotoresLaterales	4
11	AcopleMotorDC	2
12	BaseMotorPalaInferior	2
13	CostillaCentralAngulosRectos	2
14	CostillaSimpleSoportesLateralesAngulosRectos	9
15	ElevadoresSoportePalaFrontal	2
16	EncapsiladoTuercaPalaFrontal	2
17	EslabonPalaFrontal	4
18	EspaciadorSistemaPala	2
19	MotorDC	2
20	VarillaCostillaCentralCuadradaCorta	1
21	VarillaCostillaCentralCuadradaLarga	1
22	VarillaRoscadaCostilla405mm	3
23	VarillaRoscadaCostilla500mm	3
24	VarillaRoscadaVarillaCuadrada104mm	1
25	VarillaRoscadaVarillaCuadrada114mm	1
26	BaseBateria	1
27	LlantaGiratoria25mm	1
28	CepilloLlantasLaterales	2
29	DefensasLlantasLaterales	2
30	EscuadraDefensal lantasl laterales	2

Figura 82: Listado de piezas para fabricación 1

33	EstructuraPlatinaAgujeroCorto	6
34	EstructuraPlatinaAgujeroLargo	8
35	EstructuraPlatinaAgujeroMedio	6
36	EstructuraPlatinaInferiorFrontalHorizontal	2
37	EstructuraPlatinaInferiorFrontalVerical	2
38	EstructuraRellenoChumaserallantasLaterales	2
39	EstructuraRellenoDerecha	10
40	EstructuraRellenoDerechaFrontalInferior	1
41	EstructuraRellenoInferiorDerecha	1
42	EstructuraRellenoInferiorIzquierda	1
43	EstructuraRellenoIzquierda	10
44	EstructuraRellenoIzquierdaFrontalInferior	1
45	EstructuraRellenoLlantaLoca	1
46	EstructuraRellenoTuboInterno	4
47	EstructuraTuboFrontalInferior420mm	1
48	EstructuraTuboInferiorDerecha391mm	1
49	EstructuraTuboInferiorIzquierda391mm	1
50	EstructuraTuboParales230mm	4
51	EstructuraTuboSoporteInterno420mm	2
52	EstructuraTuboSuperior420mm	2
53	EstructuraTuboSuperiorLateral391mm	2
54	EstructuraTuboTraseroInferior420mm	1
55	Tornillo M8x20	140
56	Tornillo M8x60	4
57	Tornillo M4x20	28
58	Tornillo M4x40	24
59	Tuerca M8	214
60	Tuerca M4	52
61	Tuerca M6	12
62	Roldana M8	70
63	Remache de 1", 1/8 diametro	65

Figura 83: Listado de piezas para fabricación 2

A continuación en la figura 84 puede observarse un listado detallado de costos de los materiales utilizados dentro de la segunda fase del proyecto. Se muestra no solo el nombre del objeto, sino que también su cantidad, su costo unitario y el costo total.

### Listado de costos de estructura de robot de café

No.	Material	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
1	Tornillo M8x20	140 unid.	Q1.30	Q182.00
2	Tornillo M8x60	4 unid.	Q2.80	Q11.20
3	Tornillo M4x20	28 unid.	Q0.55	Q15.40
4	Tornillo M4x40	24 unid.	Q0.90	Q21.60
5	Tuerca M8	214 unid.	Q1.00	Q214.00
6	Tuerca M4	52 unid.	Q0.50	Q26.00
7	Tuerca M6	12 unid.	Q0.80	Q9.60
8	Roldana M8	70 unid.	Q0.63	Q44.10
9	Tubo cuadrado de aluminio 1", 1.1 mm espesor	6 metros	Q28.14	Q168.83
	Tubo cuadrado de 420 mm	6 unid.	---	---
	Tubo cuadrado de 391 mm	4 unid.	---	---
	Tubo cuadrado de 230 mm	4 unid.	---	---
10	Remache de 1", 1/8 diametro	65 unid.	Q0.30	Q19.50
11	Varilla roscada 8 mm	3 metros	Q38.25	Q114.75
12	Varilla roscada 6 mm	1 metro	Q32.75	Q32.75
13	PLA impresiones en 3D	3.7 kg	Q210.00	Q777.00
14	Llanta giratoria 25 mm	1 unid.	Q10.00	Q10.00
			<b>TOTAL</b>	<b>Q1,646.73</b>

Figura 84: Listado de costos de piezas para fabricación

### 13.1. Plano 1

Con el fin de dar una idea de los planos realizados se tomaron tres planos relevantes en cuanto a la estructura del robot.

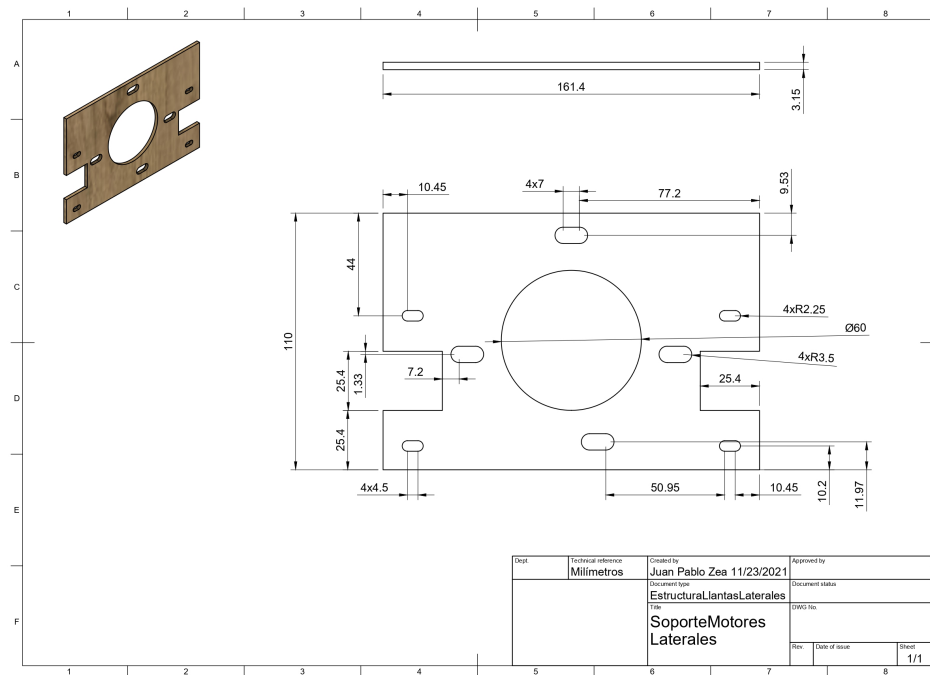


Figura 85: Plano de soporte de motores laterales MDF

Para el primer plano se tomó el diseño del soporte de MDF del motor de las llantas laterales de robot. En dicho plano se puede observar la pieza que se mandó a cortar en MDF de 3 mm, por falta de MDF de 6 mm, por lo tanto se cortó dos veces el plano y se pegaron ambas para formar una pieza de 6 mm de espesor.

Dentro del plano, como puede verse en la Figura 85, se pueden observar con detalle las dimensiones de la pieza, así también como la dimensional utilizada, que fue milímetros. Como también se podrá observar en la esquina superior izquierda el modelo en escala de la pieza.

## 13.2. Plano 2

Dentro del siguiente plano, Figura 86, puede observarse un tubo de aluminio junto con sus dimensiones de manufactura. El cual a pesar de ser un tubo de aluminio comercialmente adquirido, dicha pieza posee una alta cantidad de agujeros y un largo en específico. En el plano el tubo presenta múltiples agujeros tanto M8 que como M4. Todos los datos de las dimensiones tienen como dimensional milímetros, que se encuentra escrito en el cajetín del plano. A su vez cabe mencionar que el tubo utilizado para toda la estructura es de 1x1 pulgada de 1 mm de espesor como se menciona en la sección 9.

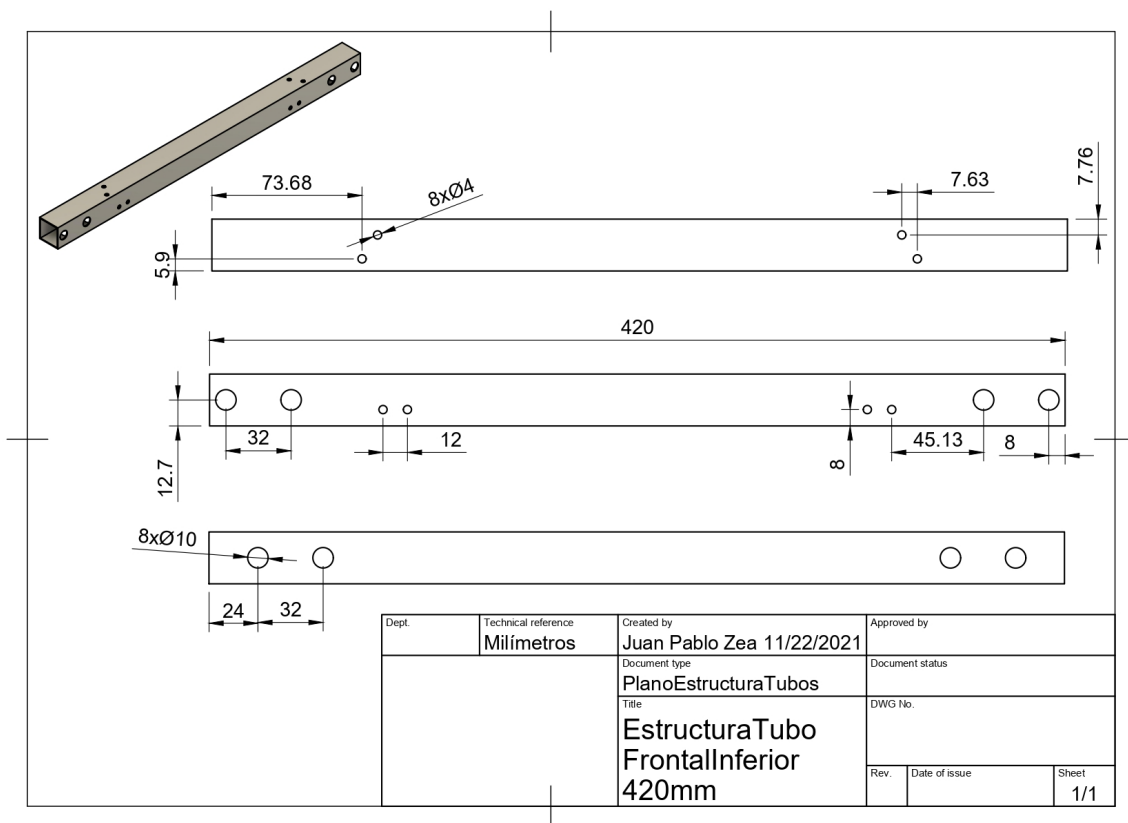


Figura 86: Plano de tubo de estructura robot aluminio

### 13.3. Plano 3

Observando el siguiente plano, Figura 87, demuestra otra ejemplo de una de las piezas de la estructura. La pieza mostrada dentro del plano es uno de los distintos modelos de platinas utilizadas en las juntas de la estructura de tubos de aluminio. Dentro del plano se encuentra detallada las dimensiones a seguir de la platina de 3 mm que se mencionó previamente en 9. Cabe mencionar que como todos los planos y todo el documento las dimensionales utilizadas para diseñar fueron milímetros, que también está mencionado dentro de cada uno de los planos. Se presentan agujeros M8 dentro del plano y dos vistas para dimensionales, acompañadas de una tercera vista a escala de la pieza diseñada.

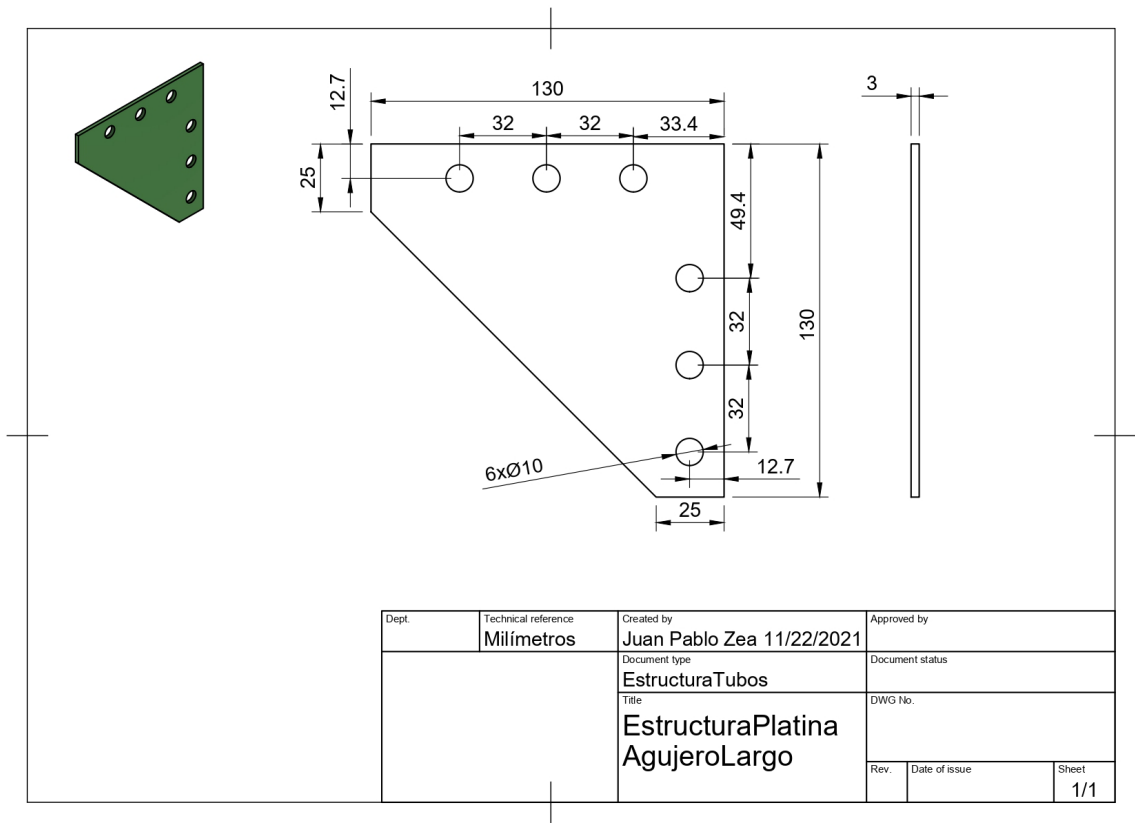


Figura 87: Plano de platina de juntas PLA



- Se diseñó e implementó un sistema de retracción para las palas con un rango de movimiento de 35 grados a nivel del suelo.
- La pala frontal es capaz de resistir una fuerza equivalente a 10 kg, dado que la barra roscada, la pieza que presenta la mayor concentración de esfuerzos, tiene un esfuerzo máximo de 11 352 psi, aproximadamente un décimo del valor máximo soportado por el material.
- El nuevo diseño de la estructura presenta mayor rigidez sin la necesidad de soldar los tubos cuadrados de aluminio.
- Las platinas fabricadas en MDF soportaron un peso de 21.1 lbs antes de presentar deformaciones en su estructura.
- Las platinas fabricadas en PLA soportaron un peso mayor a 21.1 lbs antes de presentar deformaciones en su estructura.
- Se observó una deflexión en los tubos de aluminio cuadrado antes de que la platina de acero presentara algún tipo de deformación. Se aplicó un peso mayor a 40 lbs sobre el punto más alejado del tubo.
- Las juntas de tres tubos y sus platinas son suficientes para cargar el peso del robot junto con sus componentes.
- La estructura de tubos es capaz de soportar una fuerza equivalente a 10 kg, dado que el tubo de aluminio, que es el sitio con mayor concentración de esfuerzos, presenta un esfuerzo máximo de 5152 psi, siendo un valor aproximadamente un octavo del máximo permitido por el material.
- Se rediseñó y fabricó el soporte para los motores del robot de tal forma que estos no presentan movimientos oscilantes.
- Las llantas laterales son capaces de resistir una fuerza equivalente a 10 kg, dado que el eje de acero del sistema, que es el lugar que presenta la mayor concentración de

esfuerzos, experimenta un esfuerzo máximo de 4703 psi, siendo un valor muy por debajo del permitido por el material.

- El diseño e implementación de las defensas para las llantas propuesto evita el contacto de estas con el café. Sin embargo, su resistencia es baja y propensa a las fracturas.
- Se recomendó diseño de un sistema para limpiar las llantas de los residuos de café.
- Se realizó un listado de piezas y costos de la parte mecánica del robot.
- Se realizaron planos de fabricación de todos los componentes del robot.

---

### Recomendaciones

---

El diseño de las defensas para las llantas es funcional pero la implementación con PLA es muy frágil. Adicionalmente, la altura de las defensas puede llegar a ser un problema ya que estas pueden trabarse con la irregularidad del suelo y terminar rompiéndose. Se recomienda reanalizar si las palas son terminantemente necesario y de serlo implementar un sistema con resorte para que la altura de las mismas sea variable.

La estructura implementada cumple con el objetivo de ser rígida y cargar con todos los componentes del robot. Sin embargo, la apariencia del robot es poco atractiva y posee gran cantidad de espacio interno desperdiciado. Se recomienda rediseñar la estructura de tal forma que no se pierda rigidez y a su vez analizar otros métodos de fabricación para la estructura.

Se recomienda refabricar los tubos y las platinas utilizando maquinaria CNC y material del aluminio. En las pruebas realizadas las platinas de PLA soportaron exitosamente los esfuerzos, sin embargo la fabricación es muy tardada y poco precisa. Hacer las platinas de aluminio mejoraría la estética y la rigidez del robot.

Se diseñó un cepillo con la finalidad de proveer a la llanta con un método de limpieza constante. Se recomienda adquirir el cepillo localmente e implementarlo al segundo prototipo ya existente. Al igual forma se recomienda reanalizar la viabilidad del cepillo y estudiar la capacidad de limpieza con dicho diseño.

Se recomienda para el futuro del proyecto diseñar una estructura que aisle por completo el interior del robot protegiéndolo del clima. Dado que actualmente el prototipo posee su electrónica expuesta, es necesario para el funcionamiento correcto aislar las secciones eléctricas del mismo.

Rediseñar las piezas de tal forma que se pueda fabricar todo en una cortadora CNC o en impresiones en 3D, sin la necesidad de manufactura manual. Por experiencia propia aunque se posean herramientas profesionales la manufactura manual es inexacta y laboriosa, por ello no se recomienda en lo absoluto.

Analizar el material de la pala frontal que no tenga problemas con estar expuesto a la intemperie y generar algún tipo de daño a los granos de café que sea dañino para su producción. Utilizar un material que mantenga su rigidez y no genere ningún tipo de oxidación, siendo un biomaterial.

- 
- [1] Nexus, *Elektro, el primer robot de la historia*, 2013. dirección: <https://nexusrobotica.com/elektro-el-primer-robot-de-la-historia/>.
  - [2] C. IQ, *Secado de Café al Sol y Mecánico*, 2019. dirección: <https://www.coffeeiq.co/secado-de-cafe-al-sol-y-mecanico/>.
  - [3] W. Alejandro, “Diseño de un robot para el secado de café,” UVG, 2020.
  - [4] G. Michael, *Coffee Drying*, 2006. dirección: <http://www.coffeeresearch.org/about/contactmain.htm>.
  - [5] AEA, *Propiedades del Aluminio*, 2013. dirección: <https://www.asoc-aluminio.es/el-aluminio/propiedades-del-aluminio>.
  - [6] Ingemecánica, *Pesos Específicos y Densidades de los Materiales*, 2014. dirección: <https://ingemecanica.com/tutoriales/pesos.html>.
  - [7] Maderame, *Maderas para Exterior: Tipos, Especies y Tratamientos*, 2018. dirección: <https://maderame.com/maderas-para-exterior/>.
  - [8] Habitissimo, *Los Materiales Más Aptos para Exterior | Ideas Reformas Viviendas*, 2009. dirección: <https://proyectos.habitissimo.es/proyecto/los-materiales-mas-aptos-para-exterior>.
  - [9] Montacargasyservicios, *Ventajas de las llantas cushion para montacargas*, 2018. dirección: <https://montacargasservicios.com/lp/ventajas-llantas-cushion-montacargas/>.
  - [10] Wikipedia, *Actuador lineal*, 2020. dirección: [https://es.wikipedia.org/wiki/Actuador\\_lineal](https://es.wikipedia.org/wiki/Actuador_lineal).
  - [11] Isaac, *Actuador lineal para Arduino: mecatrónica para tus proyectos | Hardware libre*, 2011. dirección: <https://www.hwlibre.com/actuador-lineal/>.
  - [12] Ganaderia, *Cepillo giratorio para vacas*, 2008. dirección: <https://www.ganaderia.com/producto/Cepillo-giratorio-para-vacas>.
  - [13] DrillBrush, *Drill Brush Power Scrubber*, 2021. dirección: <https://drillbrush.com/pages/color-charts>.



## 17.1. Planos de construcción

Se da el acceso en el siguiente URL a la carpeta donde se encuentran los planos del robot de café completo.

`https://gitlab.com/kekellner/robotCafe.git`

