

---

# Diseño y construcción de prototipo de sistema de sujeción de cargas de un transelevador para el acomodamiento de tarimas en bodega de Grupo Roca Fuerte Guatemala

---

Carlos Daniel Hengstenberg Chocooj



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y construcción de prototipo de sistema de sujeción de  
cargas de un transelevador para el acomodamiento de tarimas  
en bodega de Grupo Roca Fuerte Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Carlos Daniel Hengstenberg  
Chocooj para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

2022



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y construcción de prototipo de sistema de sujeción de  
cargas de un transelevador para el acomodamiento de tarimas  
en bodega de Grupo Roca Fuerte Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Carlos Daniel Hengstenberg  
Chocooj para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

2022

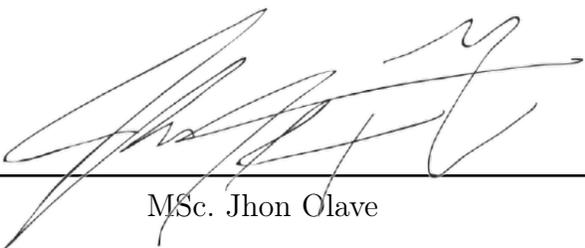
Vo.Bo.:

(f)   
MAEB. Otto Girón

Tribunal Examinador:

(f)   
MAEB. Otto Girón

(f)   
MSc. Carlos Esquit

(f)   
MSc. Jhon Olave

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de junio de 2022.

La elaboración de esta tesis ha sido posible gracias a la participación de la Universidad del Valle de Guatemala junto con Progreso Labs de Cementos Progreso y el apoyo del Grupo Roca Fuerte.

En primer lugar, quiero agradecer principalmente a Dios por ser el pilar de mi vida y de mi familia, porque sin su bendición nada sería posible, por bendecirme y acompañarme en mi vida tanto personal como académica.

Quiero agradecer en primer lugar a mis compañeros de proyecto de graduación por su compañía y apoyo en todo momento y el compartir conocimientos e ideas hizo de este proyecto fuera muy especial. En segundo lugar, quiero darle mi agradecimiento a todo el equipo de Progreso Labs, por su apoyo y consejos durante el proyecto. En tercer lugar, quiero agradecer a mi casa de estudios, la Universidad del Valle de Guatemala por inculcarme hábitos y conocimiento desde el primer día, y, por último, pero no menos importante, al Ing. Jonathan por asesorar y apoyar este proyecto de principio a fin.

Quiero agradecer a todos mis compañeros de promoción los cuales hicieron de la carrera un viaje impresionante e inolvidable, conocí a personas increíbles e hice amistades que nunca olvidaré, les agradezco por su apoyo y por esos momentos que siempre llevaré conmigo.

Quiero agradecer a mis padres, mi Madre Marlene Pacay por creer siempre en mí, por confiar en mis locuras, por su amor y apoyo incondicional, por su paciencia y hacer hasta lo imposible por verme siempre bien, por enseñarme que a pesar de las dificultades de la vida con perseverancia e inteligencia se pueden alcanzar todas las metas y porque aún en los días más ocupados siempre había tiempo para mí. Agradezco a mi Padre Alexis Hengstenberg por siempre estar para mí, por apoyarme en los mejores y en los peores momentos, por amarme y alentarme a ser un buen hombre y a mantenerme siempre humilde, le agradezco por el gran esfuerzo que siempre hizo porque no faltara un plato de comida en la casa y por enseñarme con su ejemplo a ser un auténtico caballero. les agradezco a ambos por enseñarme que todo en esta vida, por más difícil que sea, es posible con la ayuda de Dios, y porque nunca dudaron en quitarse un plato de comida por dárselo a sus hijos. los amo con mi vida y son mi más grande inspiración. agradezco a mis hermanos por darme la dicha de tenerlos como mis compañeros de vida y al mismo tiempo como mis mejores amigos, Fernando, le agradezco por

cuidarme y por brindarme cariño y apoyo incondicional, por inculcarme la competitividad y siempre querer ser mejor, por ser un ejemplo para mí por ser una maravillosa persona a la que admiro mucho, me enseñaste a no conformarme hasta ser el mejor y para lograrlo había que vencer al mejor, esa es la razón por la que siempre compito contra ti. Agradezco a mi hermano Marcelo, por ser una luz en mi vida, por apoyarme siempre y aguantarme, porque a pesar de mis cambios de humor siempre estuvo ahí para sacarme una sonrisa y hacerme olvidar todo para pasar un buen rato junto a él, por ser una motivación de superación para mí, porque en los momentos más difíciles recuerdo que tengo que seguir para enorgullecerlo y darle un buen ejemplo, le agradezco por quererme incondicionalmente y enseñarme a no rendirme, porque él es uno de mis más grandes proyectos, le agradezco por enseñarme esa nobleza que lo caracteriza y a tener un gran corazón como el de él. Y les agradezco en general por siempre apoyarme para alcanzar mis metas y sueños, los amo.

<b>Prefacio</b>	IV
<b>Lista de figuras</b>	X
<b>Lista de cuadros</b>	XI
<b>Resumen</b>	XIII
<b>Abstract</b>	XV
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Antecedentes</b>	2
2.1. Compañías de sistemas de almacenamiento en la región . . . . .	2
2.2. Compañías de sistemas de almacenamiento a nivel mundial . . . . .	3
<b>3. Justificación</b>	5
<b>4. Objetivos</b>	7
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Alcance</b>	9
<b>6. Marco teórico</b>	10
6.1. Montacargas . . . . .	12
6.2. Pallets . . . . .	13
6.3. Fase de carga y descarga . . . . .	13
6.4. Arduino . . . . .	15
6.5. Printer 3D . . . . .	15
6.6. Filamento PLA . . . . .	16

<b>7. Desarrollo</b>	<b>17</b>
7.1. Primer prototipo	20
7.1.1. Mecanismo de sujeción de cargas	20
7.2. Segundo prototipo	22
7.3. Tercer prototipo	26
7.3.1. Movimiento horizontal	26
7.3.2. Anclaje para movimiento horizontal	28
7.3.3. Giro 180°	30
7.3.4. Garra de sujeción	30
7.4. Prototipo final	35
7.4.1. Movimiento horizontal	35
7.4.2. Anclaje para movimiento horizontal	37
7.4.3. Giro 180°	40
7.4.4. Garra de sujeción	42
7.5. Cálculo de esfuerzos en pinzas de garra	44
7.6. Control de sistema	48
7.7. Software	48
7.7.1. Arduino	48
7.8. Hardware	48
7.8.1. Arduino Mega	48
7.8.2. PCB	49
7.8.3. Servomotores MG90S(prototipo final)	50
7.8.4. Servomotores MG996R(tercer prototipo)	51
<b>8. Resultados</b>	<b>52</b>
8.1. Diseño 3D	52
8.2. Análisis de garra de sujeción	59
8.3. Imágenes de transelevador automático completo	61
8.4. Estimación de cotización de prototipo para escala real	65
8.4.1. Servo actuador	65
8.4.2. Servo driver	65
8.4.3. Motor reductor	66
8.4.4. Piñón	66
8.4.5. Cremallera	67
8.4.6. Acero	67
8.4.7. PLC	68
8.4.8. Tablero	68
8.4.9. Final de carrera	69
8.4.10. Módulo Wi-Fi	70
8.4.11. Sensor de vibración	70
8.4.12. Fuente de alimentación 24V	71
8.4.13. Variador de frecuencia	71
8.4.14. Sensor de presencia	72
8.4.15. Scanner	72
8.4.16. Diagrama de flujo de lógica de código	76
<b>9. Conclusiones</b>	<b>77</b>

<b>10.Recomendaciones</b>	<b>79</b>
<b>11.Bibliografía</b>	<b>81</b>
<b>12.Anexos</b>	<b>84</b>
12.1. Planos de construcción . . . . .	84
12.2. Videos . . . . .	84
12.3. Código de Arduino . . . . .	84
12.4. Informe de análisis de tensión de garra de sujeción . . . . .	84
12.5. Diagramas de flujo de lógica para código arduino . . . . .	85

---

## Lista de figuras

---

1. Transelevador Mecalux	3
2. Transelevador SSI Schaefer	4
3. Bodega convencional con operarios	11
4. Bodega automatizada	11
5. Montacargas	13
6. Pallets	13
7. Ubicación de pallets en racks	14
8. Descarga de pallets para despacho	14
9. Software Arduino	15
10. Hardware Arduino	15
11. Printer 3D ultimaker 3	16
12. Filamento de PLA	16
13. Carril de estanterías	18
14. Modelo 3D primer prototipo	21
15. Modelo 3D primer prototipo	21
16. Unión de ejes	22
17. Garra	23
18. Riel	23
19. Especificaciones de servo motores SG90	24
20. Rieles guía para movimiento horizontal	24
21. Impresión 3D prototipo	25
22. Segundo prototipo ensamblado y unido al transelevador	25
23. Grosor de cremallera prototipo 2	26
24. Cambio de dimensión de cremalleras de 2.5mm a 5mm	27
25. Vista isométrica de riel	27
26. Pieza unión de ejes vista lateral	28
27. Pieza unión de ejes vista isométrica	29
28. Vista isométrica de riel final con ejes, piñones y arandelas	29
29. Unión para sistema de giro	30
30. Garra prototipo	31
31. Ensamble de sistema de sujeción	32

32. Ensamble	32
33. Ensamble de prototipo 3 con motores MG90S	33
34. Ensamble de prototipo 3 con motores MG90S	33
35. Ensamble de prototipo 3 con motores MG996R vista 1	34
36. Ensamble de prototipo 3 con motores MG996R vista 2	34
37. Materiales utilizados	35
38. Diseño 3D pieza acople movimiento horizontal	36
39. Diseño 3D pieza acople movimiento horizontal armada	36
40. Diseño 3D pieza unión de ejes vista 1	37
41. Diseño 3D pieza unión de ejes vista 2	38
42. Diseño 3D de unión pieza a cojinete lineal	38
43. Diseño 3D pieza unión de ejes armada vista 1	39
44. Diseño 3D pieza unión de ejes armada vista 2	40
45. Unión de garra para giro 180° con cojinetes lineales	41
46. Ejemplo de trayectoria de movimiento 180°	42
47. Diseño 3D de garra de sujeción vista 1	43
48. Diseño 3D de garra de sujeción vista 2	43
49. Diseño 3D de garra de sujeción armada	44
50. Modelo de análisis de pinza	44
51. Diagrama de cuerpo libre de pinza	45
52. Análisis con metodo de corte	45
53. Diagrama de cuerpo libre de fuerzas internas	46
54. Gráfico de esfuerzo cortante de una pinza	47
55. Gráfico de momento de una pinza	47
56. Arduino mega	49
57. Placa fabricada	50
58. Arduino mega	51
59. Servo-motor MG996R	51
60. Diseño 3D de sistema de sujeción ensamblado vista 1	52
61. Diseño 3D de sistema de sujeción ensamblado vista 2	53
62. Ensamble de mecanismo de sujeción a sistema completo	53
63. Ensamble de mecanismo de sujeción a sistema completo	54
64. Múltiples imágenes	55
65. PCB ensamblada y conectada	55
66. Pallet con carga máxima en balanza, peso: 500.2g	56
67. Sistema de sujeción cargando pallet con carga máxima vista 1	56
68. Sistema de sujeción cargando pallet con carga máxima vista 2	57
69. Sistema de sujeción cargando pallet con carga máxima vista 3	57
70. Pallet con imanes vista 1	58
71. Pallet con imanes vista 2	58
72. Análisis de estrés de garra de sujeción	59
73. Análisis de desplazamiento de garra de sujeción	60
74. Análisis de reacción de garra de sujeción	60
75. Análisis de deformación de garra de sujeción	61
76. Arduino máster de transelevador	61
77. Mono columna	62
78. Interior de mono columna	62

79. Mono columna vista 2	63
80. Ensamble completo	64
81. Ensamble completo colocando pallet	64
82. Servo actuador	65
83. Servo driver	66
84. Motor reductor	66
85. Piñón	67
86. Cremallera	67
87. PLC	68
88. Tablero	69
89. Final de carrera	69
90. Módulo Wi-Fi	70
91. Sensor de vibración	70
92. Fuente de alimentación 24V	71
93. Variador de frecuencia	71
94. Sensor de presencia	72
95. Scanner	72
96. Diagrama eléctrico máquina real	74

---

Lista de cuadros

---

1. Tabla de incidentes por montacargas	12
2. Listado de componentes máquina real	73
3. Tabla de cotización general	75

El presente trabajo de graduación consiste en la optimización del proceso carga y descarga en bodega en Guatemala. Actualmente en el país los procesos de bodega se realizan de una manera muy cotidiana en la que se ha identificado un gran potencial de mejora para eficientizar este proceso por lo que se busca revolucionar el sistema de funcionamiento cotidiano para optar por un nuevo sistema automatizado el cual realice las mismas tareas pero de una forma mucho más eficiente, reduciendo significativamente el tiempo de ingreso y egreso de productos y controlando el inventario en tiempo real mediante un sistema automatizado manejado por una computadora, así como también el uso de personal en el área, el proyecto toma como bodega modelo una de las bodegas del Grupo Roca Fuerte ubicada en Villa Nueva en zona 3.

Este documento describe el diseño y funcionamiento del sistema de sujeción de cargas de un sistema automatizado de montacargas para la bodega de Grupo Roca Fuerte, El sistema automatizado se requería que se situara en el medio de un carril de estanterías en donde pudiese ser capaz de sujetar cargas de ambas estanterías del carril, el sistema completo de automatización de montacargas está compuesto por cuatro partes fundamentales las cuales son el movimiento horizontal de base, se encarga de transportar todo el sistema de montacargas automatizado a lo largo del carril de estanterías, esta parte es la base de todo el mecanismo y se encuentra sujeto al suelo en donde hay rieles que sirven como guía para que el movimiento sea el más adecuado, la siguiente parte fundamental es el sistema de movimiento vertical, esta parte consiste en una mono columna que se encuentra justo sobre el sistema de movimiento horizontal y es el encargado de mover el transelevador que contiene a la posición adecuada en el sentido vertical, el transelevador sostiene la siguiente parte fundamental que es el sistema de sujeción de cargas, parte en la que se centra este documento, esta parte es la encargada de acercarse a las estanterías para colocar y retirar las cargas, por último, la parte de la comunicación, esta se encarga de mandar la información del inventario, el producto que entra o sale de alguna estantería es contabilizado y comunicado a la computadora central.

Para el diseño y fabricación de este prototipo se debieron de tomar muchos factores en cuenta, la bodega modelo que se utilizó ya estaba en funcionamiento y no estaba autorizado el mover estanterías o cambiar de lugar alguna otra cosa dentro de la bodega, en resumen, el prototipo debía de ser diseñado y construido en base a las dimensiones de espacios ya utilizados en la bodega, el diseñar pallets especiales para facilitar la sujeción de cargas

tampoco era una opción viable ya que sería una muy gran inversión ya que todas las bodegas de la empresa utilizan los mismos pallets convencionales por lo que se debía de trabajar con los pallets que se utilizan.

Para el diseño del sistema de sujeción de cargas se dividió en tres partes clave que son la pieza del marco, La pieza Unión de ejes y la pieza de la garra, estas tres partes tienen respectivamente una función específica para que todo el sistema de sujeción funcione adecuadamente. Las piezas fueron diseñadas por medio del software de Fusion 360 que es un programa de Autodesk especializado en diseño 3D muy parecido a Inventor pero con la modalidad de poder trabajar en conjunto en un proyecto ya que las piezas trabajadas se crean y manipulan en la nube del proyecto en donde todos los integrantes de este pueden ver e interactuar con las piezas. Para la fabricación de piezas se utilizaron tecnologías como impresión 3D con material PLA e impresión 3D con material de resina.

El sistema de sujeción utiliza dos servo-motores los cuales son alimentados por un Arduino en donde también se realizó la programación de los mismos, todo el sistema se maneja por medio de un Arduino utilizando variables globales entre cada parte del sistema para que sean compatibles a la hora de acoplar y hacer funcionar todo el mecanismo automatizado en conjunto.

This graduation work consists of the optimization of the loading and unloading process in the warehouse in Guatemala. Currently in the country the warehouse processes are performed in a very daily way in which has been identified a great potential for improvement to make this process more efficient, so it seeks to revolutionize the daily operation system to opt for a new automated system which performs the same tasks but in a much more efficient way, significantly reducing the time of entry and exit of products and controlling the inventory in real time through an automated system managed by a computer, as well as the use of personnel in the area, the project takes as a model warehouse one of the warehouses of the Roca Fuerte Group located in Villa Nueva in zone 3.

This document describes the design and operation of the load securing system of an automated forklift system for Grupo Roca Fuerte's warehouse, The automated system was required to be located in the middle of a lane of shelves where it could be able to hold loads from both shelves of the lane. The complete forklift automation system is made up of 4 fundamental parts, which are the horizontal movement of the base, which is in charge of transporting the entire automated forklift system through the warehouse, it is in charge of transporting the entire automated forklift system along the shelving lane, this part is the base of the entire mechanism and is attached to the floor where there are rails that serve as a guide for the movement to be the most appropriate, the next fundamental part is the vertical movement system, This part consists of a single column that is located just above the horizontal movement system and is responsible for moving the stacker crane that contains to the proper position in the vertical direction, the stacker crane holds the next fundamental part which is the load securing system, part in which this document focuses, this part is responsible for approaching the shelves to place and remove the loads, finally, the communication part, this is responsible for sending the inventory information, the product entering or leaving a shelf is counted and communicated to the central computer.

For the design and manufacture of this prototype many factors had to be taken into account, the model warehouse that was used was already in operation and it was not authorized to move shelves or move anything else inside the warehouse, in short, the prototype had to be designed and built based on the dimensions of spaces already used in the warehouse, designing special pallets to facilitate the securing of loads was not a viable option because it would be a very large investment since all the company's warehouses use the same

conventional pallets so it was necessary to work with the pallets that are used.

For the design of the load securing system was divided into 3 key parts which are the frame part, the axle union part and the claw part, these three parts have a specific function for the entire fastening system to work properly. The parts were designed using Fusion 360 software which is an Autodesk program specialized in 3D design very similar to Inventor but with the modality of being able to work together on a project since the parts are created and manipulated in the project's cloud where all members of the project can see and interact with the parts. For the manufacture of parts were used technologies such as 3D printing with PLA material and 3D printing with resin material.

The clamping system uses 2 servo-motors which are powered by an arduino where the programming of the same was also performed, the entire system is managed by an arduino using global variables between each part of the system to be compatible when coupling and operate the entire automated mechanism as a whole.

El presente documento de proyecto de graduación se centra en el diseño y desarrollo de un prototipo del sistema de sujeción de cargas para el mecanismo automatizado de levantamiento de cargas con el objetivo de eficientizar el proceso de carga y descarga de la bodega del Grupo Roca Fuerte.

Para el diseño del prototipo del mecanismo automatizado se trabajó con una escala determinada con el fin de poder ensamblar el prototipo y poder apreciar el funcionamiento de este en un tamaño ideal para poder observar todos los movimientos y procedimientos que el mecanismo automatizado realiza para poder llevar a cabo el proceso completo de carga y descarga de pallets, esta es una forma de verlo siendo lo más parecido a la realidad al implementarlo en las bodegas.

En este documento se centra el diseño y fabricación del prototipo para el sistema de sujeción del mecanismo automatizado, las demás piezas son mencionadas, pero cabe resaltar que son generalizadas y no se entra a detalle en información específica de dichas piezas. El sistema de sujeción se muestra desde la primer idea creada en 3D siguiendo por los prototipos ya fabricados que tuvieron errores o sufrieron modificaciones con tal de mejorar el sistema, se especifican los motores utilizados para el prototipo y los que no fueron funcionales, así como los errores y fallos que se tuvieron en el proceso de ensamblaje y también recomendaciones para evitar retrasos de tiempo por fallas en ensamble hasta llegar al prototipo final.

Para el sistema de sujeción se diseñó un riel el cual va unido a la mono columna de movimiento vertical del mecanismo, este es el encargado de desplazar la garra de sujeción hacia ambos sentidos horizontalmente mediante un sistema de piñones y cremalleras para acercarse a las estanterías y obtener los pallets, la garra irá sujeta al riel mediante un mecanismo capaz de girar 180° para que la garra pueda cambiar su sentido de sujeción entre cada estantería, la garra cuenta con dos pinzas parecidas a la de los monta cargas convencionales.

### 2.1. Compañías de sistemas de almacenamiento en la región

Los sistemas de almacenamiento autónomo son un invento que vino a revolucionar la industria ya que brinda una mayor rapidez en los procesos, eficientizando así, todo el proceso de almacenamiento ya que reduce tiempos en la colocación de los productos en sus respectivos racks y en la extracción de los mismos hasta una zona de despacho, esta tecnología se utiliza para reducir los costos de operación, reducir personal operativo, aprovechar de una mejor manera los espacios de la bodega y para evitar cualquier tipo de error humano en la manipulación de las cargas.

En nuestro país Guatemala existe una gran cantidad de empresas las cuales se dedican a la venta de diferentes productos, ya sea de construcción, alimenticios, agrícolas, agropecuarios, entre tantos otros productos más de los cuales se necesita almacenar mientras estos mismos son vendidos, las empresas grandes utilizan bodegas de tamaños considerablemente grandes para el almacenamiento de estos, la mayoría de empresas almacenan sus productos en sus bodegas utilizando racks convencionales como efectivamente lo hace el Grupo Roca Fuerte. Cabe recalcar que actualmente en Guatemala no existe operando una bodega autónoma en su totalidad y ninguna con el sistema autónomo de transelevación.

En Guatemala existen varias empresas que se dedican a brindar soluciones de almacenamiento que tratan de eficientizar los procesos para las bodegas de almacenamiento. Se tomaron tres de estas empresas más relevantes en el país como referencia para indagar más acerca del tema de almacenamiento eficiente y de cómo se podría mejorar estos procesos. Las empresas más sobresalientes en el país son las siguientes:

1. Logimerk:

Es una empresa innovadora en sistemas de almacenaje y venta de productos industriales, con más de 15 años sirviendo al mercado guatemalteco y centroamericano, ofreciendo un servicio personalizado, productos de calidad y precios competitivos. Trabajan

diseños personalizados que se ajustan a las necesidades de almacenamiento, además de contar con personal altamente capacitado para su instalación. [1]

## 2. Grupo Equisa Centroamérica.

Equisa se dedica a la comercialización de servicios de almacenamiento a nivel industrial, identificados en el mercado como la Compañía líder y de mayor prestigio y experiencia en Centroamérica en Importación, Implementación y Montaje de Sistemas de Almacenaje (Sistemas de Estanterías Metálicas) ofreciendo las mejores marcas a nivel mundial tanto en calidad, servicio, tecnología de punta y servicio técnico. [2]

## 2.2. Compañías de sistemas de almacenamiento a nivel mundial

El sistema de almacenamiento de cargas autónomo cada vez es más cotizado por las empresas que utilizan bodegas para guardar sus productos mientras estos son vendidos, esta industria de la automatización ha sido en gran parte una mejora para todas aquellas empresas que han adaptado la autonomía a sus procesos e ideologías de almacenamiento, muchas empresas de primer mundo actualmente trabajan con bodegas totalmente autónomas que funcionan de distintas maneras y una de las más eficientes y cotizadas por las empresas es el sistema automatizado por medio de transelevadores, existen varias empresas a nivel mundial que están desarrollando y vendiendo esta tecnología, sin embargo, hay ciertas empresas que destacan dentro de la industria por su alta calidad y eficacia con la que trabajan y de las cuales se tomaron como referencia para el desarrollo del sistema de almacenamiento autónomo para Roca Fuerte, las cuales se presentan a continuación:

1. Mecalux es una empresa de España pionera en la industria de almacenamiento automatizado y han hecho trabajos para empresas muy importantes de su región para empresas de renombre y se caracterizan por automatizar bodegas muy grandes. [3]



Figura 1: Transelevador Mecalux

[3]

2. SSI Schaefer.

SSI Schaefer fue fundada en 1937 como una empresa de fabricación de productos de chapa y desde entonces ha ido creciendo hasta convertirse lo que hoy en día se le conoce como el proveedor de soluciones de productos y sistemas logísticos más importante del mundo. 4



Figura 2: Transelevador SSI Schaefer

4

En la industria de la construcción generalmente se utilizan más materiales de tamaño grande que pequeños y por eso los distribuidores de estos materiales ocupan bodegas en donde sitúan todo el inventario. mediante una plataforma en internet ofrecen el catálogo de materiales que están vendiendo y la cantidad de la que disponen, en el caso de Roca Fuerte utilizan la plataforma llamada WMS que lleva toda la base de datos del inventario que disponen en la bodega. El procedimiento para los pedidos funciona mediante una orden realizada directamente desde la página web en WMS seleccionando el material y la cantidad necesaria que desea el cliente y mediante esa orden los obreros de Progreso Labs empiezan a alistar la orden cargando todo el material solicitado ya sea con monta carga o mediante los obreros para poder llevarlos al lugar de despacho, muchas veces los pedidos se atrasan ya que al tener únicamente espacio para un montacargas el tener dos o más órdenes en un periodo de tiempo corto la fila de espera se vuelve más y más larga ya que el equipo de despacho se satura tanto que en ocasiones se deben de cargar los materiales con los obreros debido a que el montacarga se encuentra ocupado, este proceso no es solo tardado sino que compromete la salud de los obreros, y ahí es en donde nuestro equipo de trabajo de graduandos de quinto año de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala encuentra una solución que consiste en la automatización de la bodega de Roca Fuerte mediante un sistema de levantamiento de cargas que actúa mediante un mecanismo que se mueve verticalmente y horizontalmente para ubicar las estanterías de donde se requiere el material que ubicará mediante posiciones matriciales, utilizará sensores ultrasónicos, un sistema de pinzas de monta carga para la sujeción de los materiales en sus respectivos pallets y una serie de rieles por donde dicho mecanismo se movilizará y llevará el pedido en un tiempo muy reducido hasta el sitio de despacho, agilizando el proceso de entrega y evitando que los clientes esperen tanto tiempo por su pedido, así como también se evitarán las cargas muy pesadas para los obreros.

En las bodegas que distribuyen materiales de construcción en volúmenes relativamente altos siempre se debe de hacer una larga espera luego de hacer el pedido ya que la demora es mientras los operadores de las tiendas alistan el pedido y lo cargan a los camiones y como en la industria de la construcción en su mayoría de veces los materiales son muy pesados y

esto hace que los operadores demoren bastante en despachar el producto a los consumidores, la demora por esperar a cargar el producto al transporte es un problema que se da y que los clientes tienen que soportar ya que no hay una manera más eficiente de cargar los productos y llevar la cuenta de los mismos, para esto se utiliza un montacargas convencional que es el encargado de despachar los pedidos hacia el área de despacho para cargar el producto y enviarlo a los clientes, los pedidos se mantienen montados sobre pallets(Figura No.1) y ordenados en una bodega con carriles de estanterías, para el sistema de levantamiento de cargas la empresa de Roca Fuerte asignó un carril entre dos estanterías para desarrollar el mismo.

Acomodamiento de cargas es un proyecto que estudia los espacios, colocación, transporte y toda la logística sobre la automatización del carril asignado en una bodega de despacho de materiales de construcción agilizando el proceso para la entrega de los productos y reduciendo el tiempo de espera de los clientes, esta es una solución que ayudará tanto a los clientes como a la tienda propia ya que se podrá despachar más pedidos por día y los compradores no tendrán que soportar una larga demora para obtener su pedido, así como también se evitarían los retrasos ya que el sistema haría el proceso de colocar los productos en las estanterías de una manera más eficiente y también se reducirían las pérdidas o descontrol de inventario ya que al momento de la colocación o extracción el sistema automáticamente irá mandando información hacia el software WMS para llevar un conteo más certero.

### 4.1. Objetivo general

Desarrollar una propuesta para el diseño y fabricación de un prototipo del sistema de sujeción de cargas en pallets de un mecanismo monocolumna automatizado capaz de colocar y retirar dichas cargas en las estanterías para la automatización de bodegas, así como la cotización para la fabricación del sistema en tamaño real.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un modelo 3D del prototipo de sistema de sujeción de cargas ensamblado para la visualización a escala del mismo.
- Diseñar un mecanismo de sujeción capaz de cargar y descargar pallets de estanterías situadas a lados opuestos de un carril en donde el sistema de sujeción estará en el medio, adaptando un sistema de giro de  $180^\circ$  mediante la utilización de servo-motores.
- Diseñar un sistema de desplazamiento horizontal de la garra con el fin de adquirir los pallets de cualquier posición situada en cualquier estantería siendo este capaz de realizar el proceso de sujeción de una forma eficiente sin comprometer el equilibrio de todo el mecanismo
- Diseñar el sistema de sujeción de forma que esta pueda ser integrada al sistema completo automatizado, conectandose con las demás fases del proyecto como lo son el movimiento vertical de monocolumna, el movimiento de riel y la comunicación entre mecanismo-interfaz.
- Incorporar un algoritmo que nos permita procesar los datos enviados desde la interfaz hacia el mecanismo, para determinar la secuencia de movimientos del sistema de sujeción.

- Implementar una garra capaz de soportar pallets con cargas de hasta 500 gramos.
- Obtener un listado de materiales y componentes para la realización del sistema en tamaño real.

En este proyecto tiene como alcance principal el diseño y fabricación de un prototipo funcional del sistema de sujeción del mecanismo automatizado de transelevador a una escala personalizada de las medidas de la bodega de Grupo Roca Fuerte, capaz de operar en conjunto acoplado a las demás partes del transelevador para tener un funcionamiento completo y cumplir con los objetivos específicos del sistema de sujeción.

Mediante el software de diseño Inventor de Autodesk, se busca mostrar el prototipo más a detalle con la realización del modelo 3D de las diferentes piezas del sistema de sujeción del mecanismo automatizado de transelevador, así como también el modelo del ensamble completo del sistema de sujeción y el ensamble con todo el sistema de sujeción acoplado al sistema completo del transelevador.

La fabricación y el ensamble completo del sistema, tiene como objetivo mostrar el funcionamiento del sistema completo a una escala menor que las medidas reales, esto para ejemplificar todos los movimientos y procedimientos que realiza y poder ver los beneficios que aportará, siendo este prototipo lo más parecido a lo que sería la fabricación real del sistema. A parte el prototipo funcional se brinda una selección de componentes electrónicos, motores, materiales sugeridos y componentes mecánicos para la fabricación del sistema de sujeción del sistema de transelevador en tamaño real, así como también, la cotización detallada de cada uno de estos.

Las empresas grandes y medianas que cuentan con inventario suelen utilizar espacios de almacenaje como bodegas para guardar todos los productos que tienen en venta mientras estos son vendidos, los tamaños de las bodegas desde medianas hasta muy grandes dependiendo del producto que la empresa disponga, en el caso de Roca Fuerte, es una empresa que se dedica a mantenimientos integrales de edificios e instalaciones y cuentan con el equipo y suministro necesario para dichos servicios, esta empresa almacena productos como: pisos cerámicos, equipo para construcción, vigas de acero, mesas, sillas, pulidoras, entre otras. Roca Fuerte al ser una empresa muy reconocida cuenta con un inventario muy extenso por lo que utiliza bodegas muy grandes, utilizan pallets para colocar sus distintos tipos de productos los cuales van colocados en una serie de estanterías que se encuentran situadas en carriles. El proceso de carga y descarga de las bodegas de Roca Fuerte es el mismo proceso que se realiza en la mayoría de las bodegas al rededor del mundo, mediante montacargas los cuales son operados por el personal de la empresa y estos son los encargados de la carga y descarga de los productos dentro de la bodega. En Roca Fuerte se utiliza específicamente la siguiente metodología para el proceso de carga y descarga:

Un operario en montacargas: este es el encargado de manejar el montacargas y de retirar y colocar los pallets de sus respectivas estanterías. Un operario escaneando códigos: Los lugares en las estanterías cuentan con códigos de barras los cuales sirven para guardar la información del espacio de la estantería, este operario es el encargado de escanear el código respectivo del producto que sale o entra de cada estantería, esto para enviar a la base de datos de qué lugar de la estantería fue extraído el producto o bien, colocado, esto para llevar el control de donde específicamente se encuentra cada producto y que lugar se encuentra vacío. Un operario de software: Los datos enviados desde el scanner son enviados al software para llevar el conteo de que producto ha sido despachado y la cantidad de unidades disponibles, este es el encargado de pasar la información de los pedidos realizados en la plataforma hacia los operarios de bodega para que hagan el proceso de despacho. [5]

Esto suma un total de almenos dos operarios por montacargas, y en bodegas grandes se utilizan hasta tres o cuatro montacargas dando un total de ocho operarios si fuera el caso.

El proceso de carga y descarga de productos de una bodega requiere de mucho personal para poder llevarse a cabo, por lo que el automatizar una bodega ayudaría a reducir casi en su totalidad el personal en el área de bodega (como se muestra en la comparación mostrada en la Figura 4 y Figura 5) aprovechando esa ayuda obrera en otra área de la compañía, o bien, reduciendo los costos de personal.



Figura 3: Bodega convencional con operarios

3

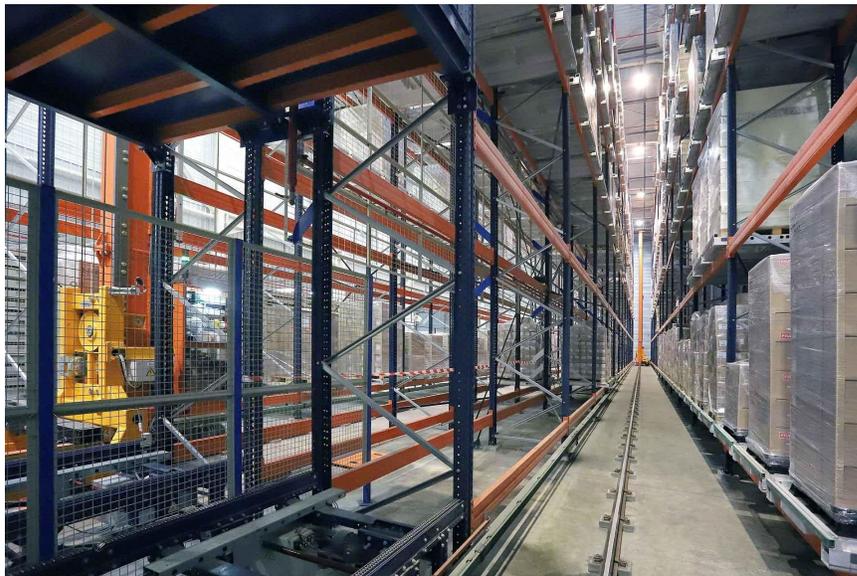


Figura 4: Bodega automatizada

3

El llevar el proceso de carga y descarga de productos de una bodega es un trabajo duro y requiere de mucha concentración por parte de los operarios que lo realizan ya que requiere de mucha precisión por parte de los montacargas y de un buen manejo de los mismos, y esto es algo que muchas veces se descuida por causas externas o bien por el mismo error

humano, provocando accidentes y daños tanto para la estructura de la bodega, para los productos e incluso para la integridad de los operarios, es por es que el tener una bodega automática reduce por completo el error humano haciendo que el trabajo se realice con la mayor precisión posible y evitando toda clase de accidentes por distracciones u otras causas. Debido a la constancia con la que suceden todo tipo de accidentes con montacargas en la industria, el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional NIOSH (por sus siglas en inglés) [6] de Estados Unidos solicita ayuda para prevenir lesiones y muertes entre los trabajadores que operan montacargas o trabajan cerca de los mismos. Muchos de estos accidentes pueden ayudar a evitarse si se siguieran al pie de la letra las disposiciones que establecen la normas OSHA, la misma que estima que ocurren alrededor de seiscientos ochenta mil cuatrocientos accidentes de montacargas cada año, y se lastiman alrededor de nueve mil trabajadores. [7]

Las volcaduras de montacargas son la causa principal de las muertes que tienen que ver con montacargas y representan cerca del veinticinco por ciento de todas las muertes relacionadas con montacargas. En los Estados Unidos, mil veintiun trabajadores perdieron la vida debido a lesiones traumáticas sufridas en siniestros relacionados con montacargas entre 1980 y 1994. El sistema de vigilancia NTOF (Sistema Nacional de Vigilancia de Accidentes Ocupacionales Traumáticos, por sus siglas en inglés) utiliza certificados de fallecimiento para identificar las muertes relacionadas con el trabajo. Estas muertes fueron el resultado de los siguientes tipos de siniestros: [6]

Tipo de incidente	porcentaje total de víctimas
Volcamiento de montacargas	22
Trabajadores a pie golpeados por el montacargas	20
Víctimas aplastadas por montacargas	16
Caídas de montacargas	9

Cuadro 1: Tabla de incidentes por montacargas. Censo de Lesiones Ocupacionales Mortales (CFOI) [6]

Actualmente por lo menos ochenta y cinco accidentes de montacargas por año a resultado en muerte, con otros treinta y cuatro mil novecientos accidentes de montacargas que resulta en lesiones graves, de acuerdo con la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) la información estadística. Adicionalmente sesenta y un mil ochocientos accidentes con lesiones debido a montacargas se clasifican como no fatal cada año. [7]

## 6.1. Montacargas

Para soportar el peso de las cargas y transportarlas de un lugar a otro se utilizan montacargas los cuales son operados por personal de la empresa y maniobrados en los carriles de estanterías, estos son los encargados de colocar y retirar los pallets de sus respectivos lugares. Los montacargas son equipos especializados de elevación, apoyan en las tareas de carga y transporte de objetos de grandes dimensiones y pesos, sobre todo para el sector industrial, los montacargas ayudan a que los productos se pueden almacenar en estanterías o racks, y maximizar el espacio de los almacenes. [8]



Figura 5: Montacargas

8

## 6.2. Pallets

Los pallets son armazones rígidos sobre los que se coloca la mercancía distribuida de forma homogénea en altura y superficie que abarcará sobre el pallet. Los pallets, y en consecuencia la carga, serán transportados de un lado a otro del rack o la bodega mediante gruas horquilla o transpaletas.<sup>9</sup>



Figura 6: Pallets

9

## 6.3. Fase de carga y descarga

El proceso de ubicación de productos empieza desde que el producto es llevado a la bodega ya sea por medio del proveedor o por los camiones transportadores de la empresa, al estar ya en la bodega en el área de espera, los productos recién ingresados son colocados en respectivos pallets en donde el montacargas es el encargado de tomarlos y los colocarlos

en la posición de la estantería correspondiente. Para la fase de descarga, se debe de ubicar la posición específica en las estanterías del producto solicitado, cuantificarlo dependiendo de la cantidad deseada por el cliente y despacharla de la bodega al área de repartición de productos en donde trasladan el producto directamente hacia el camión que transportará todo el material. Los operarios encargados del proceso utilizan los montacargas para colocar cada pallet en su lugar y maniobrando el vehículo entre los carriles de estanterías, este es un proceso en el que toma mucho tiempo completarlo. En la industria de almacenaje tanto el espacio como el tiempo son factores muy importantes que pueden influir drásticamente en las ganancias o pérdidas de la empresa, por lo que la reducción del tiempo en los procesos es un tema del que siempre se habla en la directiva de las empresas, y Roca Fuerte no es una excepción, sabiendo que al aprovechar mejor el espacio en la bodega y completando este mismo proceso en una cantidad menor de tiempo sin comprometer la seguridad industrial significaría un gran beneficio para la empresa, por lo que el desarrollar un sistema mecánico automatizado es un proyecto de ingeniería que beneficiaría grandemente a la empresa tanto en costos y gastos como en innovación y crecimiento, para cumplir esto el mecanismo debe de transportar estas cargas con una velocidad mayor a la de un montacargas convencional, agilizando el tiempo de entrega de los pedidos y haciéndolo de una manera más segura que el método convencional. 10



Figura 7: Ubicación de pallets en racks

10



Figura 8: Descarga de pallets para despacho

10

## 6.4. Arduino

Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador re-programable y una serie de pines hembra. Estos permiten establecer conexiones entre el microcontrolador y los diferentes sensores y actuadores de una manera muy sencilla y mediante el software de Arduino permite manipular los componentes de la forma deseada, empleando el lenguaje de programación C. [11]



Figura 9: Software Arduino

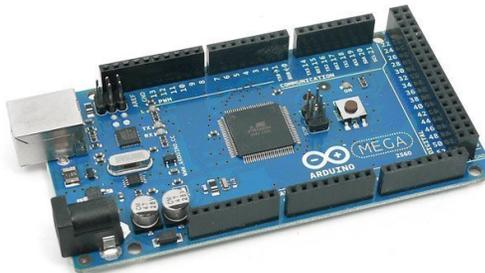


Figura 10: Hardware Arduino

## 6.5. Printer 3D

La impresora 3D ultimaker 3 es preciso hasta veinte micras (0.02mm) y soporta todos los materiales. Desde el PLA, pasando por el nylon y el policarbonato para PC, hasta el ABS y el TPU Flexible. Esta impresora cuenta con un volumen de impresión de 215 x 215 x 215 x 215 x 300 mm el espacio suficiente para fabricar las piezas deseadas para este prototipo por lo que es una excelente herramienta que nos permite pasar las ideas de diseño a una pieza real funcional. [12]

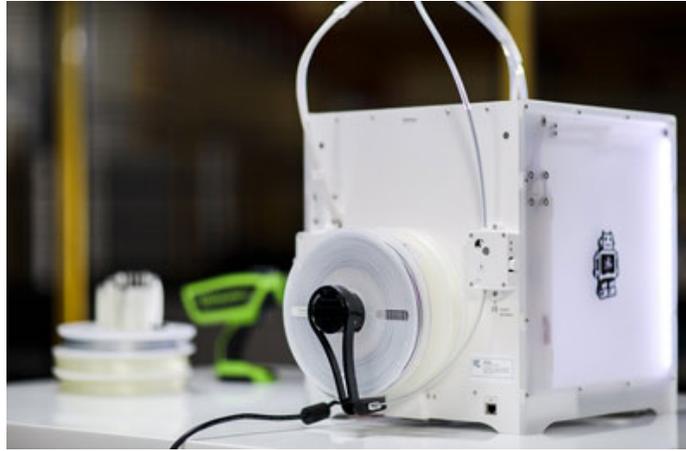


Figura 11: Printer 3D ultimaker 3

12

## 6.6. Filamento PLA

El filamento PLA es uno de los materiales más populares y utilizados en la industria de la impresión 3D ya que este es un material resistente con capacidades muy similares a las del plástico convencional pero con la diferencia que el PLA es un material amigable con el medio ambiente en comparación con otros materiales tales como el PET, ya que está hecho a base de maíz<sup>13</sup>



Figura 12: Filamento de PLA

14

Para llevar a cabo el sistema automatizado de levantamiento de cargas se dividió el proyecto en fases para el análisis correcto de todos los componentes y estructuras que lo conforman, estas fases se fueron trabajando con el tiempo hasta llegar a un resultado satisfactorio tanto para el equipo de graduandos de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica como para el personal de Cementos Progreso y Roca Fuerte. A cada integrante del grupo del proyecto se le asignó una parte importante para idear, prototipar y desarrollar por lo que cada parte es sumamente importante y dependiente de las demás partes para el completo funcionamiento del sistema automatizado. La parte que se me fue asignada es el sistema de sujeción de cargas del mecanismo, encargada de recibir, colocar y soportar la carga del pallet y su contenido, este sistema debe de poder desplazarse hacia abajo o hacia arriba paralelamente a la monocolumna, el conjunto de pinzas de sujeción debe hacer un movimiento horizontal para acercarse a las estanterías y obtener o colocar los pallets, así como también debe de poder trasladarse junto con la monocolumna en el riel paralelo al suelo hacia el área de despacho, debe de poder asegurar el pallet y su contenido para que durante los movimientos este no pueda caerse ni agitarse de manera que se dañen los materiales o productos, todo esto mientras se soporta el peso de las cargas.

Las fases para el desarrollo del sistema de sujeción del sistema de monta cargas para la bodega de Roca Fuerte fueron las siguientes:

### **Conocimiento de campo de trabajo**

Se visitaron las instalaciones de la bodega de Roca Fuerte de Cementos Progreso para conocer el lugar específico en donde se realizará el trabajo para obtener datos importantes como el espacio disponible para el desarrollo del proyecto, y obtener ideas a simple vista del posible funcionamiento del sistema, para el proyecto fue asignado únicamente un carril

dentro de la bodega siendo este el que se encuentra justo en el centro de la misma ya que la bodega está construida a dos aguas por lo que el carril del centro es el más alto (Figura 13), cuenta con una viga justo en lo más alto que atravieza todo el carril el cual ayudará para la sujeción de todo el sistema de levantamiento de cargas, durante la visita se pudo observar como estaban las cargas en todas las estanterías y estas se encuentran montadas sobre un pallet (Figura 6) ya que es una base que se utiliza para facilitar el transporte de estos materiales al ser más fácil para un montacargas agarrarlo. El carril de estanterías que fue asignado cuenta con un total de 380 espacios para pallets, 190 por cada estantería.



Figura 13: Carril de estanterías

## Lluvia de ideas

Para la lluvia de ideas se analizaron todas las medidas tomadas durante la visita a la bodega de Roca Fuerte, para tomar en cuenta el tamaño del mecanismo y las funciones que este pudiera realizar. Se comenzó analizando el sistema de desplazamiento horizontal del mecanismo para que tuviera un tamaño adecuado para alcanzar los 380 pallets que se encuentran en el carril asignado, luego se analizó el sistema de movimiento vertical que se encargara de subir y bajar la distancia necesaria para alcanzar los pallets y poder obtenerlos sin ningún problema, seguido de eso se analizaron las posibilidades del levantamiento de cargas ya que tenía que ser capaz de sujetar las cargas de ambas estanterías, todo esto tomando en cuenta que el carril no podía modificarse, ni cambiar de lugar las estanterías ni el estilo de pallets, se debía de crear un sistema totalmente compatible con la estructura que ya contaba la empresa de Roca Fuerte. Al final se analizó el software del sistema que se conecta con el inventario que lleva la empresa por medio de la plataforma de WMS.

El sistema de monta cargas que se decidió implementar es de tipo monocolumna, el hecho de hacerlo monocolumna ayudó a utilizar de una mejor manera el espacio disponible y dando la posibilidad al mecanismo de girar a 180° sin tener que mover todo el mecanismo hasta un extremo del carril, haciéndolo bicolumna nos obligaba por el espacio a trasladar todo el mecanismo hacia un extremo del carril para que el sistema de sujeción cambiara de sentido para obtener cargas de la estantería opuesta, quitándonos mucho tiempo por lo que el eliminar una columna sin comprometer la funcionalidad del mecanismo fue de mucha ayuda para obtener un diseño óptimo y funcional, esto no afectará el mecanismo ya que las cargas con las que se estarían trabajando la monocolumna funcionaría de una buena manera ahorrando espacio y material de fabricación.

Para el sistema de sujeción se definieron metas específicas que se debían alcanzar para cumplir con lo necesario para tener un sistema de sujeción exitoso las cuales se muestran a continuación:

1. Ser un sistema preciso:

Este al contrario de las garras convencionales de los montacargas tenía un reto en particular ya que se necesitaba que la garra extrajera los pallets con una precisión muy alta para evitar cualquier accidente. para esto se diseñó una plataforma que irá unida a la mono columna la cual será la encargada de subir y bajar la garra a la altura necesaria dependiendo de que posición de estantería se requiera alcanzar, cuenta también con un sistema de piñones y cremalleras los cuales son los encargados de realizar el movimiento horizontal de la garra que hace que la garra alcance los pallets y los coloque o retire dependiendo del caso. gracias a las medidas tomadas durante los cálculos y el diseño de las estanterías para el prototipo, se conoce el punto exacto en el cual la garra debe de acercarse a las estanterías para iniciar el proceso de colocación o extracción de pallets.

2. Ser un sistema seguro:

El trabajar con una precisión muy alta y el ser un mecanismo totalmente automatizado ayuda a eliminar por completo el error humano durante el proceso de carga y descarga de la bodega, esto hace que el proceso sea mucho más seguro que utilizando los montacargas convencionales y evita los accidentes tanto para los productos como para la integridad de los operarios que normalmente se encuentran en el área de bodega. Las posiciones de cada espacio de las estanterías están medidas a escala por lo que en cada espacio el mecanismo procederá a ubicar la posición exacta tanto en el eje vertical como el horizontal para realizar un proceso impecable siendo lo más seguro posible. así como el movimiento de cambio de sentido de la garra haciendo que se dirija a la estantería opuesta, la realizar el giro en el medio del carril unido a la mono columna hace que se eliminen los accidentes de montacargas por maniobrar y chocar dentro de las bodegas.

3. Reducir los tiempos de carga y descarga:

El sistema de sujeción debe de despachar y colocar una mayor cantidad de pallets que un montacargas normal, pero haciendo el proceso en un menor tiempo. Para esto se diseñó el sistema de giro de 180 grados el cual permite a la máquina cambiar de sentido para proceder a tomar o colocar un pallet de cualquiera de las dos estanterías, este

sistema se diseñó especialmente para reducir el tiempo en el que el montacargas se tarda en dar vuelta dentro de los carriles, el sistema de sujeción cuenta con un scanner el cual se encarga de leer el código de barras que se encuentra en cada espacio de las estanterías respectivamente y al retirar o colocar un pallet manda la información directamente al software del sistema para hacer más eficiente y rápido el control del inventario ya que en la empresa usualmente lo hacía un operario.

#### 4. Capacidad de carga y descarga en dos sentidos:

El sistema de sujeción al situarse en medio del carril de estanterías se requiere que sea capaz de sujetar cargas en ambas estanterías, uno de las acciones que causa accidentes dentro de las bodegas con montacargas es el hecho de realizar giros dentro de los carriles de estanterías, y para evitar estos inconvenientes se realizó un sistema capaz de girar en 180 grados para al estar el sistema completo de sujeción de la carga en el medio del carril montado en la mono columna del mecanismo, fuese más sencillo realizar giros y dando la posibilidad de colocar y retirar cargas en ambas estanterías del carril.

## 7.1. Primer prototipo

### 7.1.1. Mecanismo de sujeción de cargas

El mecanismo de sujeción de cargas es una de las partes más importantes de todo el sistema, ya que es el encargado de sujetar las cargas que se desean mover, estas se encuentran situadas en pallets repartidas tanto en la estantería de la derecha como la de la izquierda, el mecanismo tiene que ser capaz de soportar todo el peso de las cargas incluso cuando todo el sistema se encuentra en movimiento y teniendo las dimensiones lo suficientemente precisas para poder hacer una correcta interacción entre las pinzas y el pallet. para el diseño y fabricación de este mecanismo de sujeción se siguió una serie de pasos para poder cumplir con todas las funciones requeridas que se describen a continuación:

Para el primer prototipo se tenía pensado trabajar con un transelevador bi columna, por lo que el sistema de sujeción se encontraría en el medio de las dos columnas sujetándose de ellas mediante un sistema con ruedas y motores que hacían que el sistema de sujeción subiera o bajara dependiendo de la posición que se necesitara como se muestra en las siguientes imágenes.

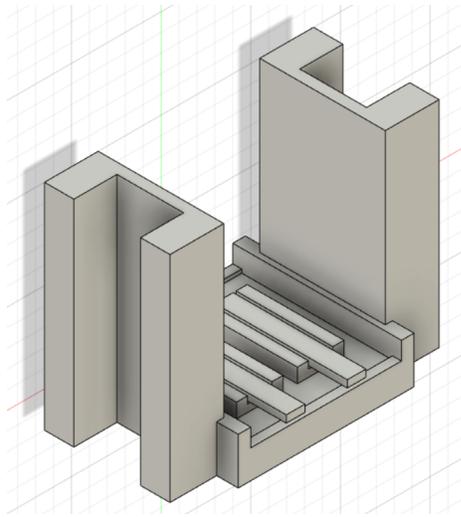


Figura 14: Modelo 3D primer prototipo

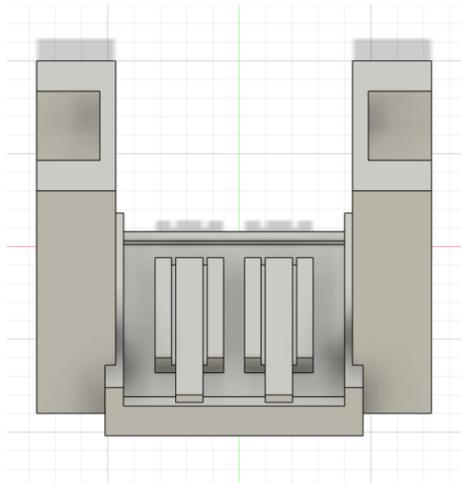


Figura 15: Modelo 3D primer prototipo

Este fue un diseño de prototipo en el que se detectaron desventajas muy tempranamente por lo que no se procedió a fabricar debido al cambio drástico de todo el sistema, ya que tanto el sistema de bicolumna podría mejorarse como también el sistema de sujeción podría hacerse de una manera más eficiente. Algunas de las desventajas que se encontraron al utilizar un sistema bicolumna y el primer diseño del sistema de sujeción son:

- El espacio que el sistema abarcaría sería mucho y no se aprovecharía al máximo los espacios entre estanterías.
- Perjudica la movilidad del sistema a la hora de querer descargar un pallets de la garra.
- Se compromete el equilibrio del sistema de sujeción para alcanzar las cargas de ambas estanterías ya que se había planeado utilizar rieles que quedarían en voladizo, esto limitaría el peso máximo de carga.

Luego de ver las desventajas se decidió diseñar un sistema de transelevador mono columna por lo que el sistema de sujeción se rediseñó por completo, dividiéndolo en tres partes fundamentales que serían el Riel, la Unión de ejes y la garra. Pensado para realizar todos los movimientos necesarios mediante dos servomotores SG90 los cuales estaban ensamblados en la parte de arriba de dos de las piezas del sistema, para el ensamble se utilizaron tornillos y superglue para evitar las vibraciones y movimientos no deseados lo que nos lleva al segundo prototipo.

## 7.2. Segundo prototipo

El prototipo rediseñado se muestra en las siguientes figuras:

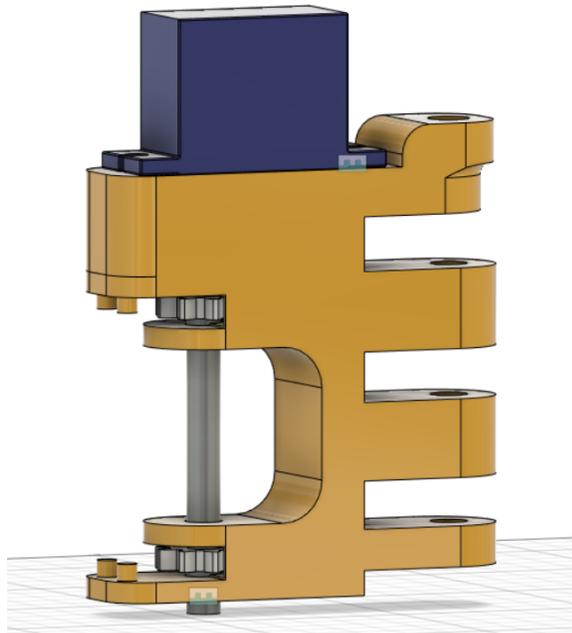


Figura 16: Unión de ejes

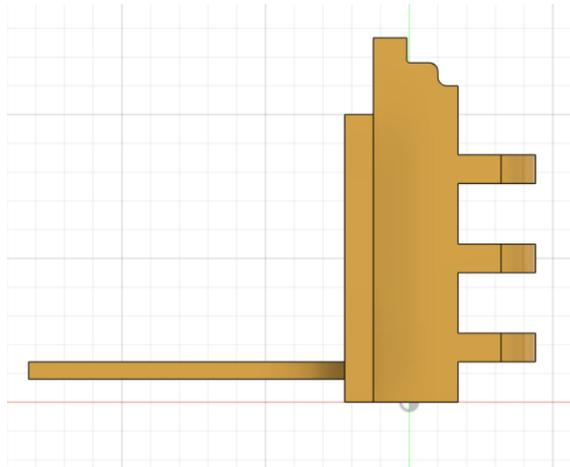


Figura 17: Garra

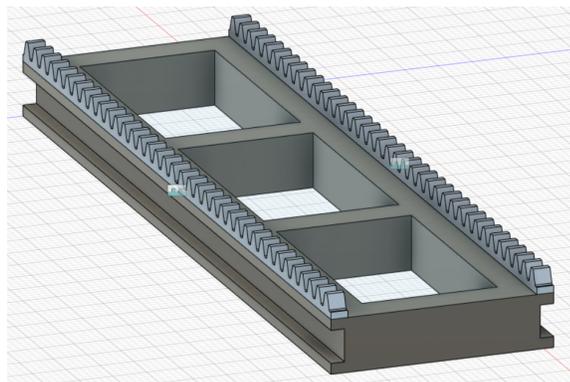


Figura 18: Riel

Para este prototipo se utilizaron servo motores SG90 los cuales producen un torque que al principio se penso que era suficiente, sin embargo, a la hora de unir el eje que transmite la potencia del servomotor, no soportó muy bien el torque producido por los piñones y las cremalleras, y se le dificultaba hacer el movimiento deseado siendo estos también de un material de plástico lo que no era lo suficientemente resistente para lo requerido, por lo que se decidió cambiar de servo motores para el prototipo final. Las especificaciones técnicas se muestran a continuación en la siguiente figura.

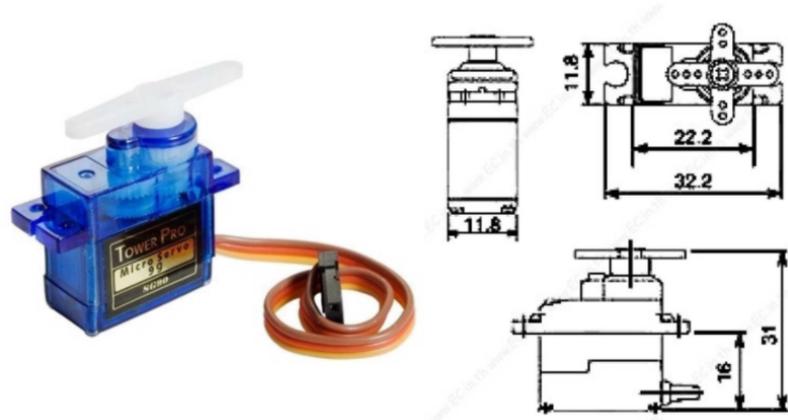


Figura 19: Especificaciones de servo motores SG90

15

Utilizando un eje el cual sería el encargado de mover el eje con 2 piñones que funcionan con la cremallera del Riel, siendo el encargado de realizar el movimiento horizontal el cual se encarga de acercar la garra hacia ambas estanterías para poder tomar o soltar las cargas. El sistema completo va sujeto al transelevador mediante la unión de la pieza Riel con la mono columna, esta pieza cuenta con 2 rieles los cuales reciben 2 pines que encajan para guiar el movimiento horizontal de la pieza Unión de ejes, estos rieles se muestran en la siguiente figura.

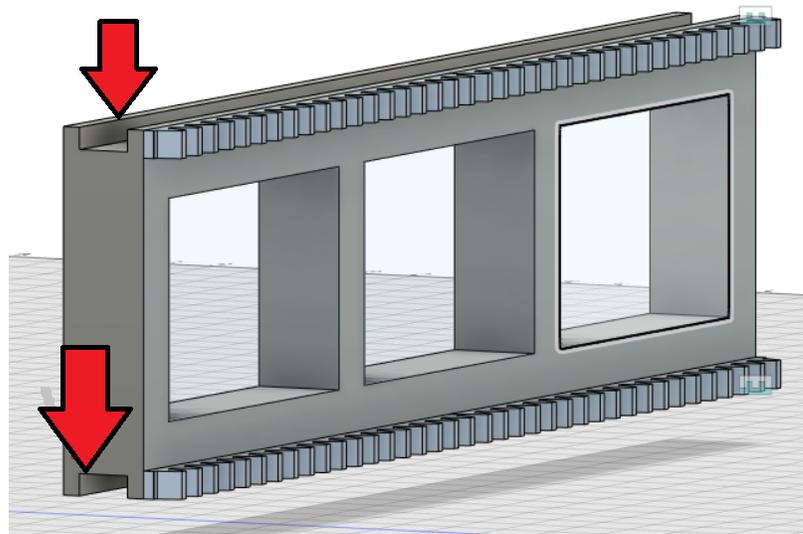


Figura 20: Rieles guía para movimiento horizontal

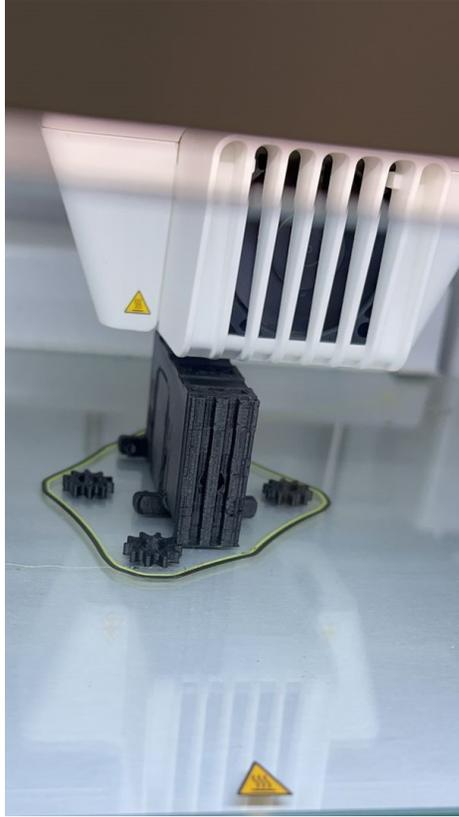


Figura 21: Impresión 3D prototipo



Figura 22: Segundo prototipo ensamblado y unido al transelevador

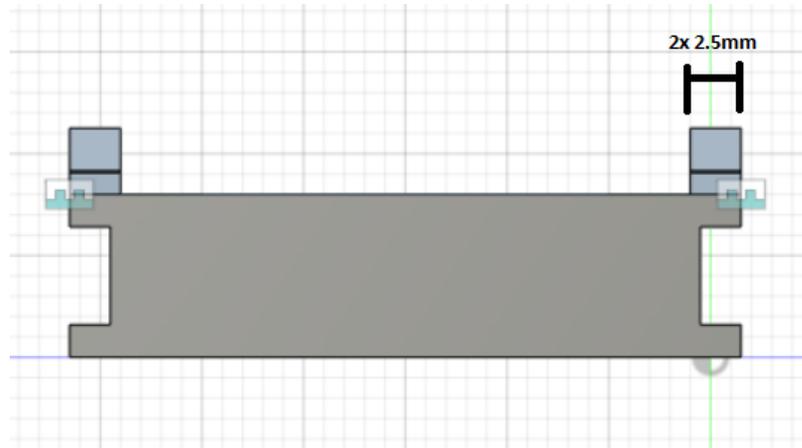


Figura 23: Grosor de cremallera prototipo 2

Este prototipo sería la base del prototipo final por lo que se procedió a fabricar para empezar a realizar las pruebas, sin embargo, en las pruebas empezaron a surgir problemas de los que habría que solucionar mediante un rediseño de las piezas o mediante simples ajustes en las medidas. Luego de identificar los distintos problemas en el ensamble se procedió a solucionarlos.

Se había diseñado la pieza Unión de ejes con dos pines en la parte superior y otros dos en la parte inferior para sujetar el riel y guiar el movimiento de todo el sistema de sujeción, sin embargo, era muy inestable haciendo que al cambiar de sentido de movimiento horizontal, provocando inestabilidad en todo el sistema por lo que se decidió agregar un tercer pin en ambas partes eliminando este error. Se rediseñó la parte de Unión de ejes separando más los apoyos de los ejes, con la ayuda de 2 arandelas por piñón haciendo que estos hagan el contacto correcto con la cremallera.

## 7.3. Tercer prototipo

### 7.3.1. Movimiento horizontal

El movimiento horizontal del sistema de sujeción es el encargado de acercar el mecanismo hasta cada rack en donde se encuentran los pallets con los productos, así mismo es el encargado de una vez obtenido el pallet, retirarlo del rack para llevarlo a la posición media del carril para poder desplazar este hasta la zona de despacho o ya sea inversamente si se quiere colocar un pallet en un respectivo rack, como el sistema automatizado se encuentra en el medio del carril de estanterías, este debía de ser capaz de acercarse a la estantería que se encuentra al lado derecho como a la de la izquierda.

Para resolver esto, se diseñó un marco que se sitúa justo en la unión entre la mono columna y el sistema de sucesión, todo el sistema de sucesión está unido a este marco y se sujeta mediante 6 pines que irán en la parte superior e inferior del marco 3 respectivamente dentro de un riel el cual ayuda tanto a sostener todo el sistema de sujeción como para guiar el movimiento horizontal. Para desarrollar el movimiento se aplicó la técnica de piñón

cremallera, en la parte frontal del marco se encuentran dos cremalleras como se muestra en la Figura 25, el par de piñones está montado sobre la pieza unión de ejes la cuál es la pieza central del sistema de sujeción (Figura 28), estos son accionados mediante un servo-motor que se encuentra en la parte superior de dicha pieza y transmite la potencia a través de un eje el cual acciona los piñones para que todo el sistema de sujeción pueda trasladarse para ambos sentidos, cumpliendo la necesidad de poder sujetar cargas de ambas estanterías.

Un problema que se detectó en el prototipo 2 era el que el engrane no casaba exactamente con la cremallera haciendo que se descarrilara, por lo que se procedió a cambiar las dimensiones de las cremalleras de 2.5mm de grosor a 5mm teniendo un largo de 120mm y 38 dientes cada una, y los piñones cuentan con un grosor de 5mm cada uno y tienen 10 dientes por lo que el diseño final de la pieza Riel para el prototipo 3 se muestra a continuación en la siguiente figura:

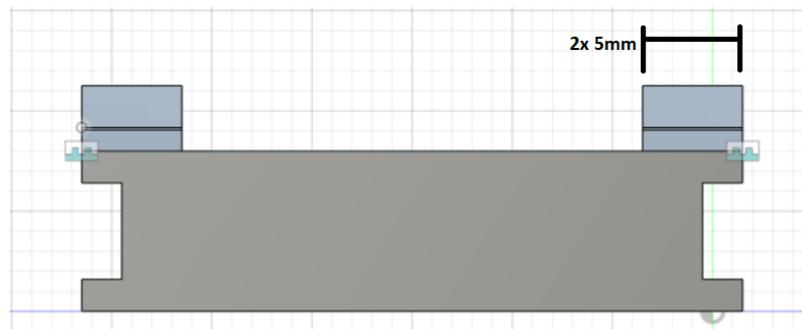


Figura 24: Cambio de dimensión de cremalleras de 2.5mm a 5mm

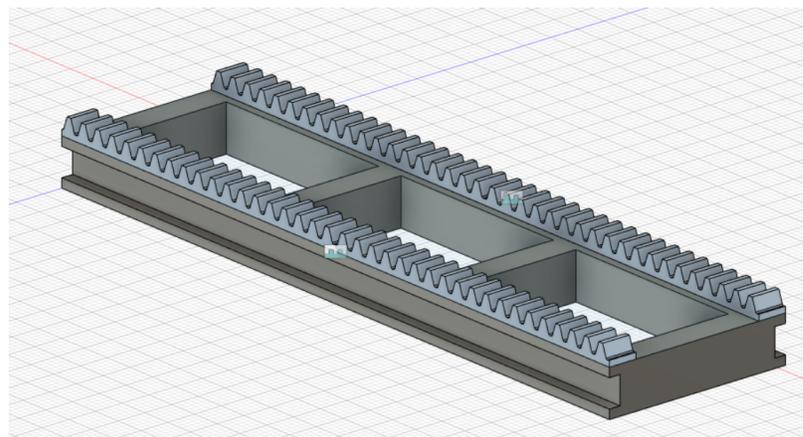


Figura 25: Vista isométrica de riel

Para la fabricación de las cremalleras y los piñones se utilizó material de impresión 3D de resina ya que al imprimirlo en PLA como el resto de las piezas estos por el tamaño que tenían y la tolerancia de las impresoras 3D tendían a hacer fricción entre ellos a la hora de accionar el movimiento causando que se trabara la cremallera con los piñones ya que no hacían un contacto suave, esto también era causado por el roce que había en los rieles, por lo que se decidió utilizar resina ya que al momento de la fabricación con este material la precisión de

impresión aumenta significativamente haciendo que el movimiento entre cremallera y piñón fuera suave y más efectivo que con PLA, eliminando el problema mencionado únicamente con la desventaja que la resina es menos resistente que el PLA.

### 7.3.2. Anclaje para movimiento horizontal

La pieza de anclaje es la encargada de sujetar todo el sistema de sujeción al marco que estará unido a la mono columna, este cuenta con 6 pines situados 3 arriba y 3 abajo para encajar en el carril del marco y guiar el movimiento de todo el sistema de sujeción a través del marco, en la pieza de anclaje irán montados los dos servo-motores que se encargarán de proporcionar el torque necesario para que el sistema gire o se mueva en la dirección requerida.

Servo-Motor 1: Este motor está situado en la cavidad que se encuentra en la parte superior de la pieza de anclaje como se muestra en la Figura 29, este es el encargado del movimiento horizontal brindando el torque necesario al eje que atraviesa los piñones, este hará girar el eje en el sentido requerido para trasladar el sistema de sujeción a la estantería con la que se va a interactuar (izquierda o derecha)

Servo-Motor 2: El segundo servo motor se encuentra montado tanto en la pieza de anclaje como a la pieza de la garra (Figura 29), este es el encargado del giro de 180° al momento de accionarse este provoca que la carcasa del servo-motor gire, ya que el eje del servo va empotrado a una parte de la pieza de anclaje, haciendo que por inercia mueva la pieza de la garra que irá unida a la pieza de anclaje mediante un eje hecho de un tornillo sin fin que funciona como pivote para que esta pieza realice el giro al grado necesario.

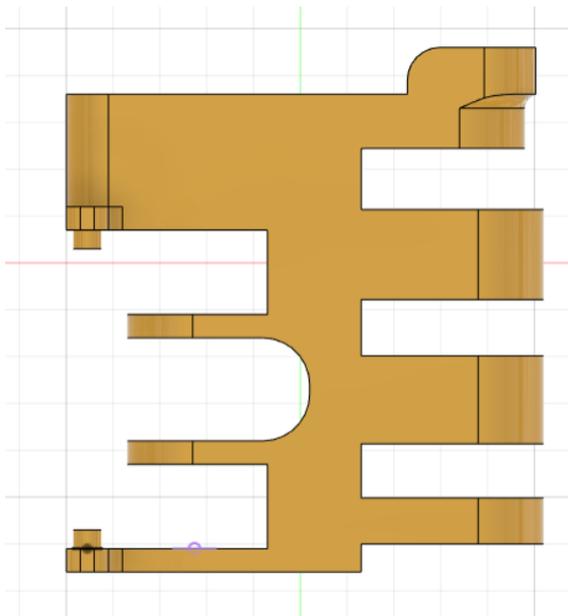


Figura 26: Pieza unión de ejes vista lateral

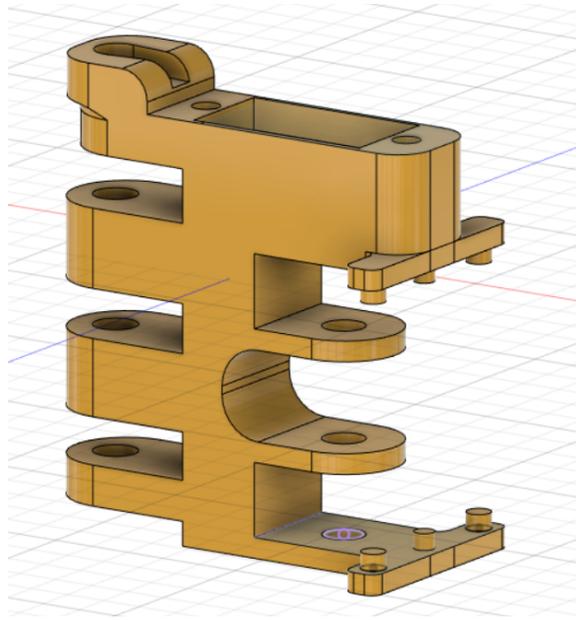


Figura 27: Pieza unión de ejes vista isométrica

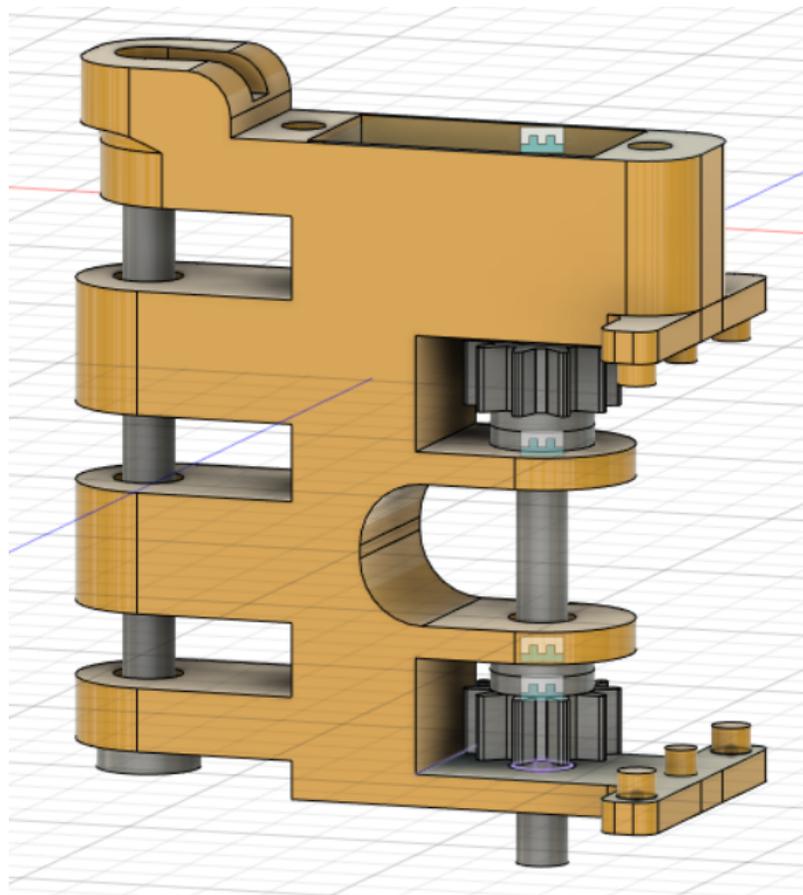


Figura 28: Vista isométrica de riel final con ejes, piñones y arandelas

### 7.3.3. Giro 180°

La solución más eficiente para poder tomar pallets de las estanterías izquierda y derecha es implementar que el mecanismo de sujeción pueda girar 180° para que el sentido de las pinzas cambie y quede encarando al pallet de la otra estantería sin estorbar o perjudicar la estructura del sistema, al estar en un extremo del riel de movimiento horizontal las pinzas podrán obtener un pallet de una estantería, y al tener el sistema de sujeción justo en el centro del riel, este puede hacer girar el sistema para que el conjunto de pinzas quede en cara hacia el lado contrario. El sistema cuenta con un motor que transmite su potencia a un eje en el cual está sujetado el conjunto de pinzas el cual realiza la tarea de girar las pinzas y que cambien de sentido.

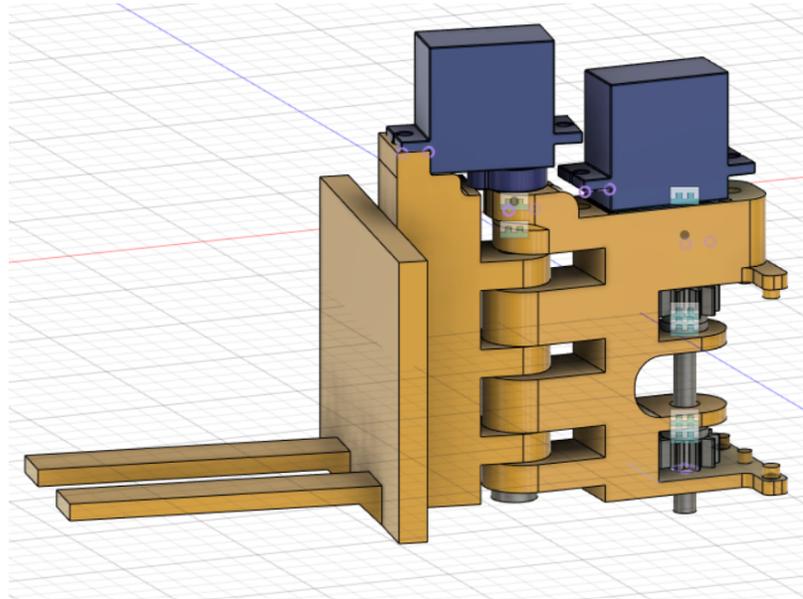


Figura 29: Unión para sistema de giro

Para conseguir este movimiento se utilizó un servomotor que está unido mediante tornillos a la parte superior de la pieza de la garra sujetando dicha pieza, y teniendo el eje del servomotor conectado a la pieza de Unión de ejes haciendo que al momento de accionar el servomotor este gire sobre su eje y llevando la garra en la dirección adecuada. para este eje que le permite girar a la garra se utilizó un tornillo sin fin ya que la rosca de este le permite una mejor adherencia entre piezas haciendo que gire de una manera más eficiente.

### 7.3.4. Garra de sujeción

La sucesión de la carga se diseñó con base en un par de pinzas como las de los monta cargas convencionales, estas pinzas encajan perfectamente con los orificios que un pallet convencional tiene y los cuales utiliza Roca Fuerte para colocar sus distintos productos, se diseñó de esta manera el juego de pinzas para adaptar la máquina en su totalidad a la estructura que Roca fuerte maneja sin tener que hacer ningún cambio, estas pinzas están diseñadas para poder tomar pallets incluso de las filas al ras del suelo de las estanterías,

cosa que no realizaba con anterioridad Roca Fuerte, ya que en las dos primeras filas tenían un área de pick in con productos muy pequeños los cuales se encargaban los operarios de colocar y extraer.

Esta pieza fue poco modificada a comparación con el segundo prototipo ya que funcionó muy bien en todas las pruebas, únicamente se hizo la modificación de agregar un chaflán en las pinzas para brindar un mejor soporte al esfuerzo de corte que esa sección de la pieza sufría al sostener alguna carga, tal como se muestra en el círculo rojo de la siguiente figura.

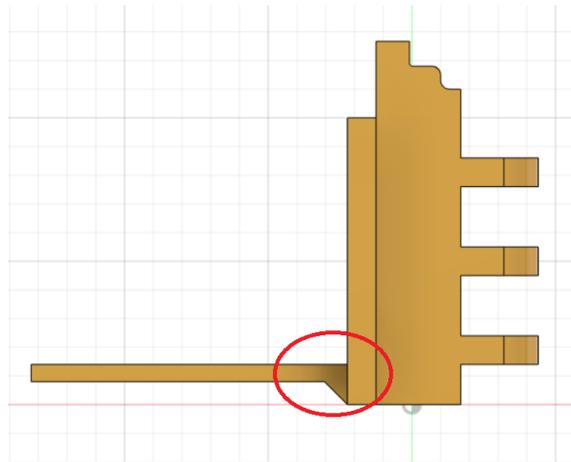


Figura 30: Garra prototipo

A continuación, se muestran imágenes del prototipo final ensamblado y fabricado, tanto en modelo 3D como en el prototipo físico, mediante los cambios que se realizaron de los prototipos anteriores se pudo llegar a un prototipo totalmente funcional y efectuando sus objetivos de la mejor manera. En ciertas partes se utilizaron materiales extras para realizar las uniones de piezas como el uso de poxilina para unir un eje metálico con el plástico y superglue para reforzar la unión de los tornillos mediante la unión de la carcasa de los servomotores al plástico de la estructura.

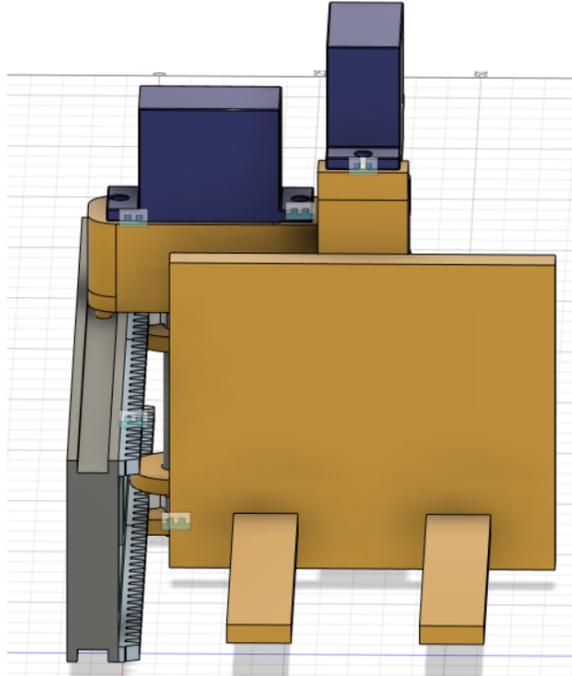


Figura 31: Ensamble de sistema de sujeción

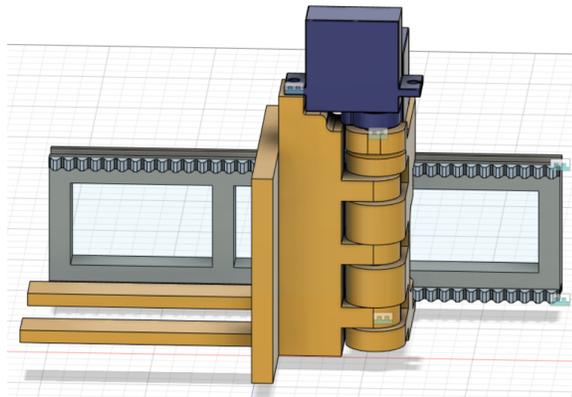


Figura 32: Ensamble

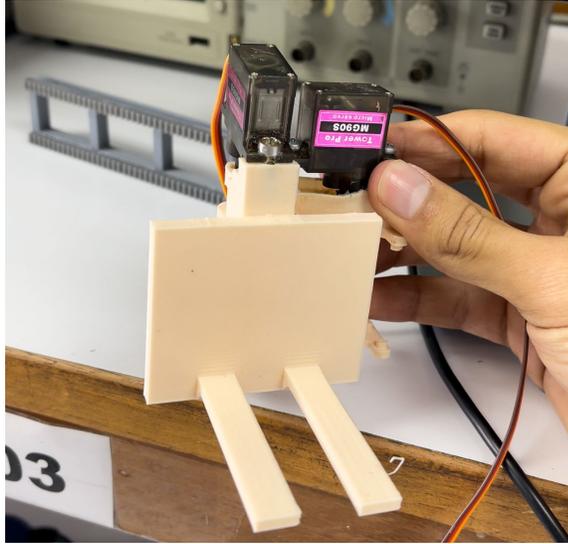


Figura 33: Ensamble de prototipo 3 con motores MG90S

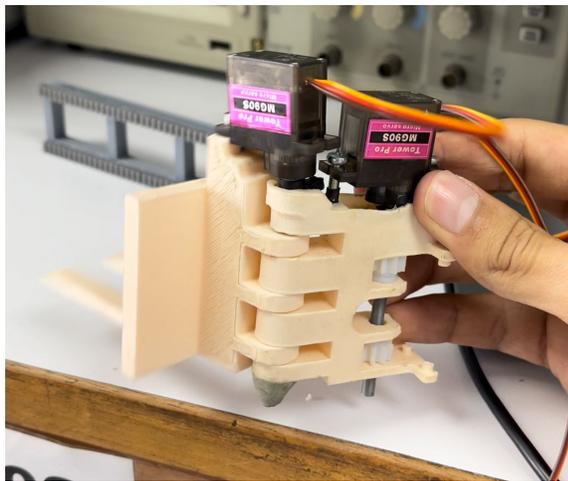


Figura 34: Ensamble de prototipo 3 con motores MG90S

El prototipo mostró ciertas dificultades para realizar el movimiento horizontal ya que las cremalleras y los rieles hechos de filamento junto con la pequeña imprecisión de la fabricación de las piezas provocaban mucha fricción en el movimiento y al motor se le dificultaba poder hacer el movimiento por lo que se decidió hacer una modificación y cambiar los motores MG90S por unos con mayor potencia que son los MG996R, y para esto se realizaron cambios en las dimensiones de las piezas para poder colocar los nuevos motores sin ninguna complicación.

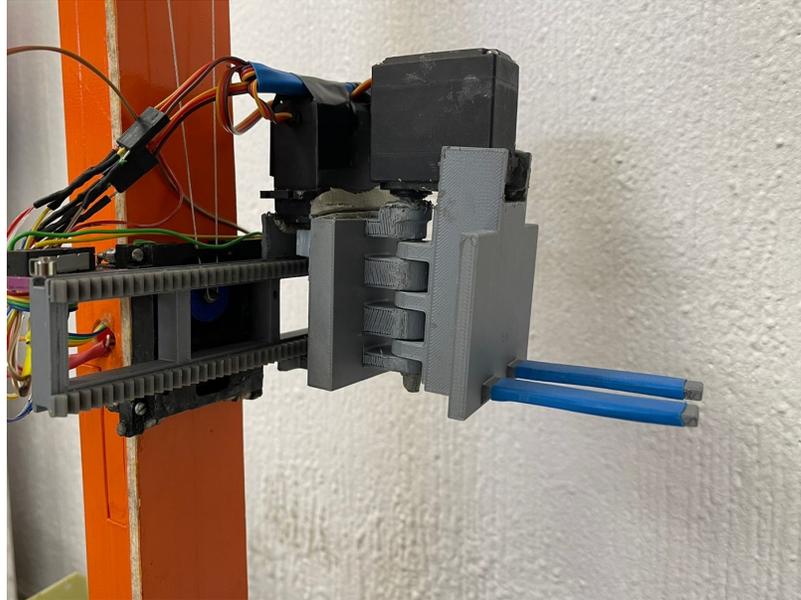


Figura 35: Ensamble de prototipo 3 con motores MG996R vista 1

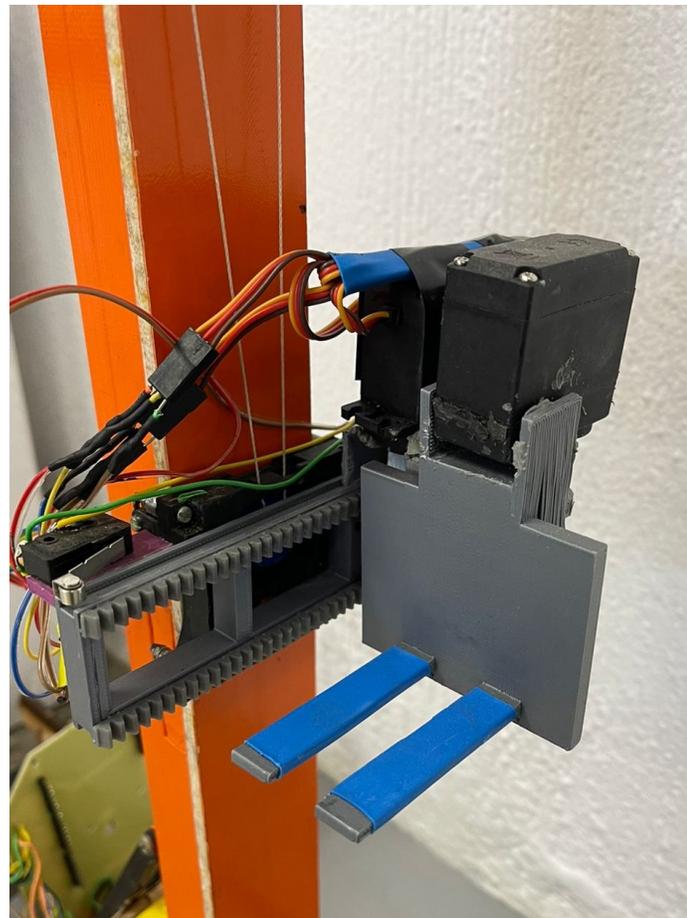


Figura 36: Ensamble de prototipo 3 con motores MG996R vista 2

## 7.4. Prototipo final

### 7.4.1. Movimiento horizontal

Para los prototipos anteriores se notaba que en el movimiento horizontal había un problema de inclinación de todo el sistema de sujeción que hacía que el equilibrio de toda la máquina se viera comprometido por lo que se diseñó un nuevo sistema de movimiento horizontal utilizando materiales más resistentes y precisos que ayudarían a eliminar este problema, para esto se cambió el riel de dos cremalleras por dos rieles hechos de varillas fabricadas con acero inoxidable 304 (imagen a, Figura 37) [16](#) a las que el mecanismo de sujeción va conectado mediante un par de cojinetes lineales (imagen b, Figura 37) que hacen el desplazamiento mucho más suave ya que reduce significativamente la fricción que se creaba en ambas cremalleras y en los rieles del prototipo anterior y se utilizó únicamente una cremallera, esto permitió el cambio de los motores MG996R a los MG90S nuevamente ya que no era necesario aplicar tanta fuerza para poder realizar el movimiento efectivamente.

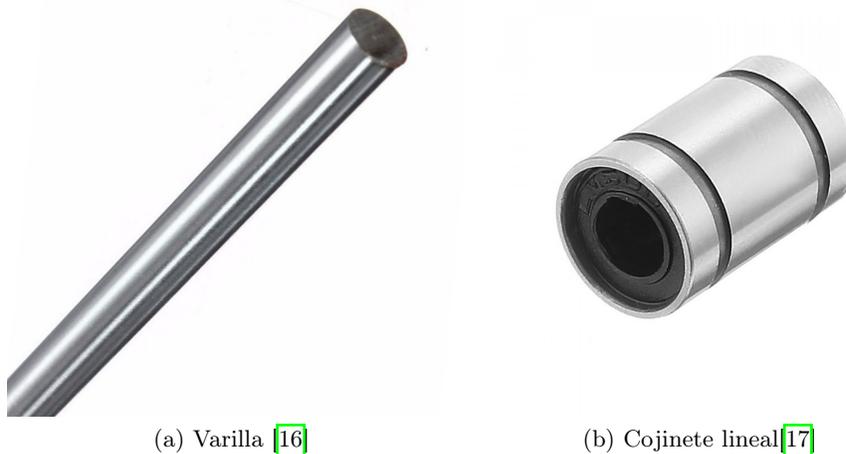


Figura 37: Materiales utilizados

Para el diseño de la pieza acople movimiento horizontal se diseñaron dos tapaderas que son las encargadas de sellar el agujero por el cual se introducen los ejes hechos por las varillas metálicas, esto se hizo con el fin de dar la posibilidad de cambiar los ejes si en alguna ocasión estos fueran dañados o simplemente por darles mantenimiento estos pueden salir por estos agujeros al retirar las tapaderas como se muestra en la Figura No.39.

Los agujeros que se encuentran en patrón cuadrado en la parte alta de la pieza son los encargados de sostener todo el mecanismo de sujeción uniéndose a la pieza del movimiento horizontal con tornillos y asegurándolos con tuercas.

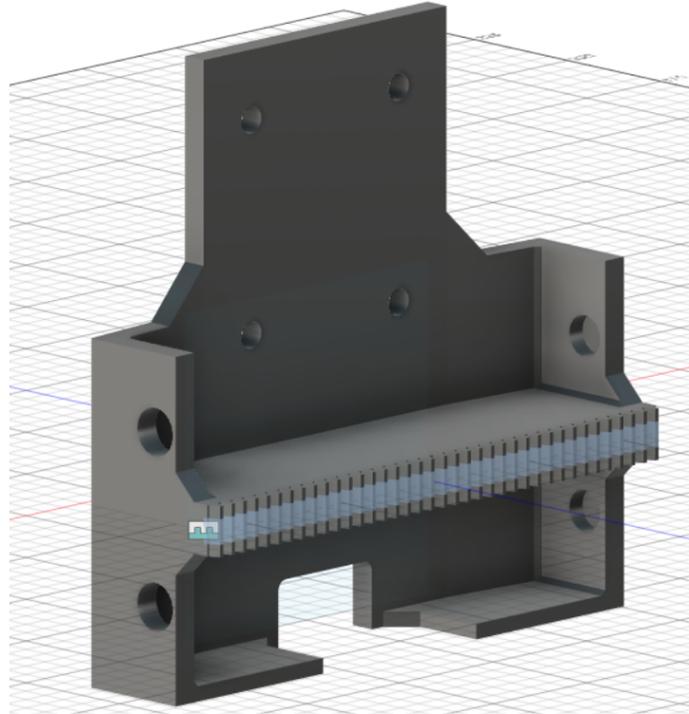


Figura 38: Diseño 3D pieza acople movimiento horizontal

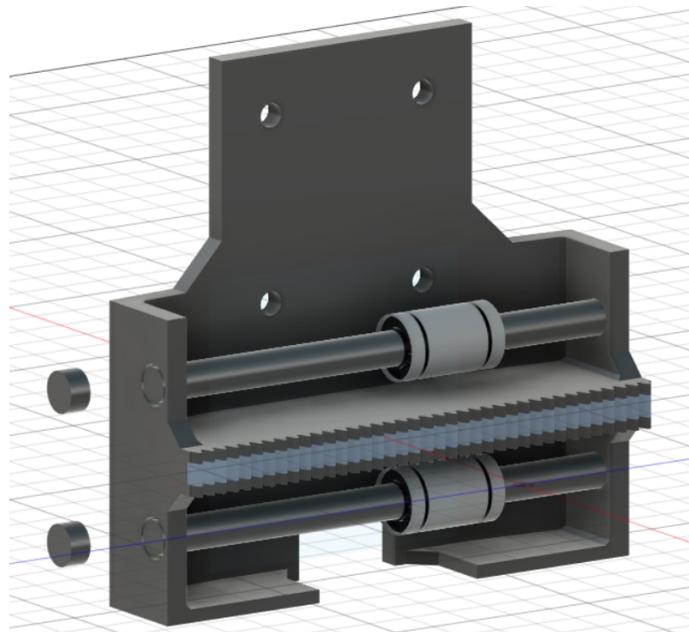


Figura 39: Diseño 3D pieza acople movimiento horizontal armada

#### 7.4.2. Anclaje para movimiento horizontal

Para el anclaje de movimiento horizontal se siguió el mismo concepto de los prototipos anteriores pero con ciertas modificaciones ya que esta vez la conexión con los rieles es mediante cojinetes lineales por lo que la pieza se debía adaptar para poder brindar un buen soporte y que quedara lo suficientemente ajustado para no provocar movimientos involuntarios que impliquen el desequilibrio del sistema, se utilizaron cinchas de amarre de plástico para mantener sujetas ambas piezas y tornillos M3 para sostener tanto el servo-motor 1 como el servo-motor 2. Los cojinetes lineales hacen un movimiento muy suave y con una fricción significativamente reducida a comparación con los rieles del prototipo anterior y gracias a esto se eliminó una de las dos cremalleras y se ubicó en el centro, esta cremallera se fabricó con PLA al igual que el piñón, en el prototipo anterior el piñón era de resina, sin embargo, luego de varios intentos la resina comenzaba a ceder y a presentar pequeñas fracturas por lo que se procedió a fabricarlos en PLA pero con una precisión mayor y con un tiempo de impresión mucho más lento para mantener la calidad de las dimensiones y funcionó adecuadamente.



Figura 40: Diseño 3D pieza unión de ejes vista 1

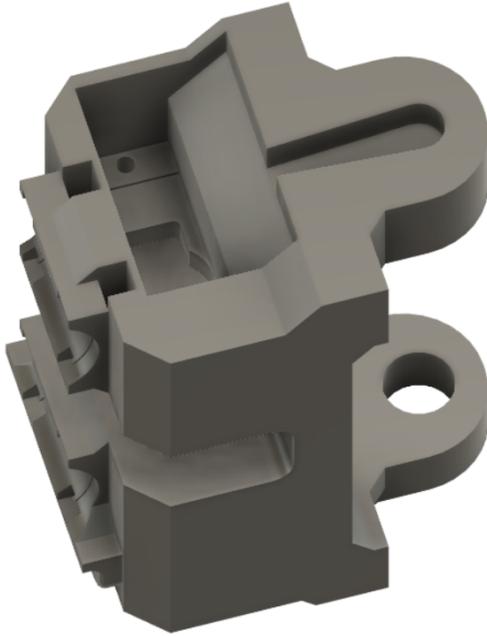


Figura 41: Diseño 3D pieza unión de ejes vista 2

Para conectar esta pieza con los cojinetes lineales se diseñó una especie de molde con forma de los cojinetes lineales para que cazara a la perfección y no se deslizara ni hubieran movimientos no deseados así como también se utilizaron pequeñas ranuras que atravesaban la parte trasera de estos moldes haciendo carril por el cual las cinchas de amarre plásticas pasan (Figura No.42) y al ajustarlas hacen que la pieza quede completamente segura y unida a los ejes lineales permitiéndole hacer el movimiento horizontal sin ningún inconveniente.

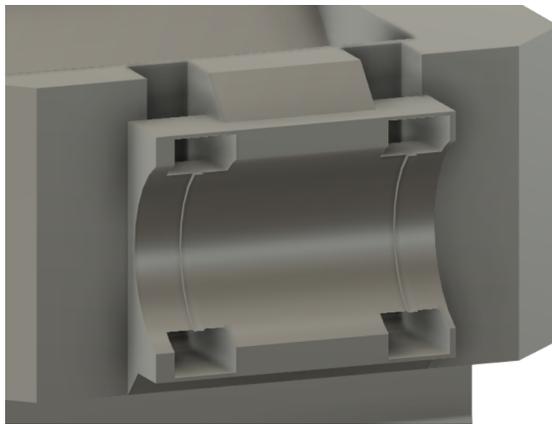


Figura 42: Diseño 3D de unión pieza a cojinete lineal

Esta pieza es la pieza más compleja de todo el mecanismo de sujeción ya que es la que más componentes lleva unidos siendo un total de siete que son: los cojinetes lineales del movimiento horizontal, el servomotor 1 con el piñón que aplica la fuerza para el movimiento vertical con la cremallera, el servomotor 2 que gira la garra recolectora, el eje para el movi-

miento 180° y los dos cojinetes lineales que unen a la garra recolectora para el giro 180°. En las siguientes figuras No.43 y No.44 se puede apreciar la pieza con todos sus componentes ensamblados.

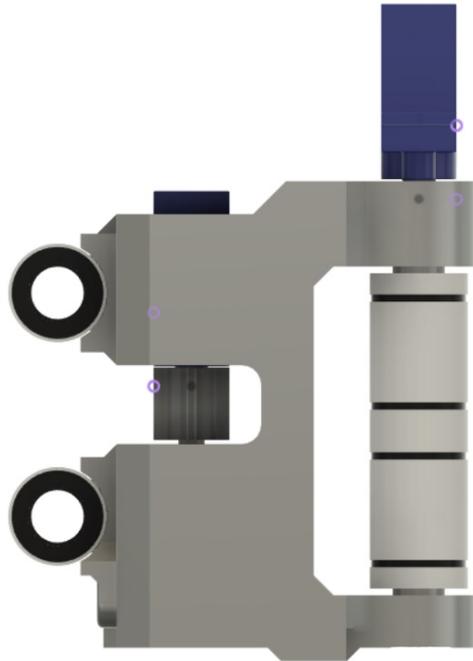


Figura 43: Diseño 3D pieza unión de ejes armada vista 1

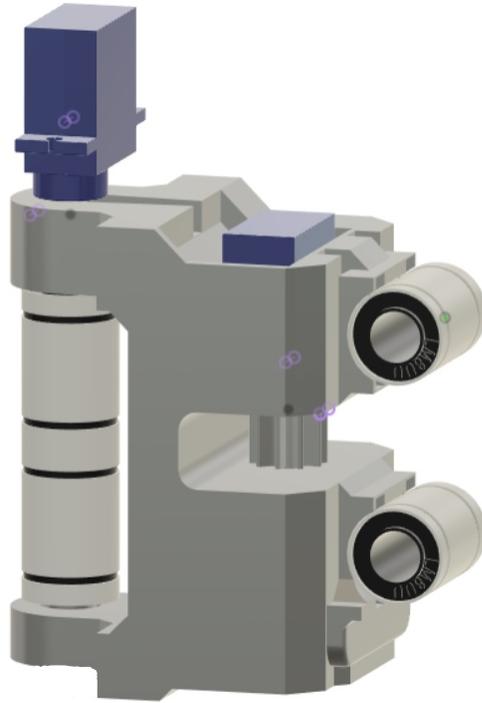


Figura 44: Diseño 3D pieza unión de ejes armada vista 2

### 7.4.3. Giro 180°

Para el sistema de giro 180° se utilizó el mismo concepto que los prototipos anteriores pero se cambió la conexión entre el anclaje para movimiento horizontal con la garra de sujeción, en el prototipo anterior había mucha fricción y roce al momento de girar la garra en su rango de 180° por lo que se decidió aplicar un par de cojinetes lineales y anclar ambas piezas mediante cinchas de amarre con el mismo molde para sujetar los cojinetes lineales que en la unión entre el riel y el anclaje de movimiento horizontal y se muestra a continuación en las siguientes imágenes.

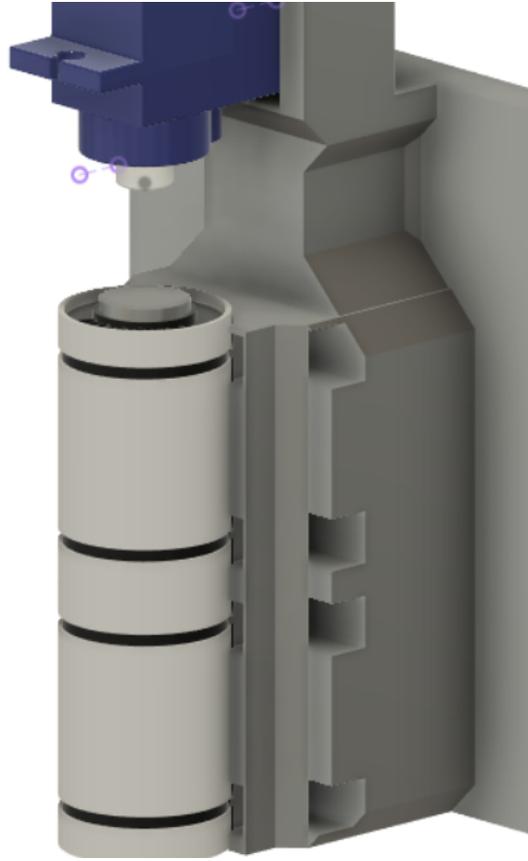


Figura 45: Unión de garra para giro 180° con cojinetes lineales

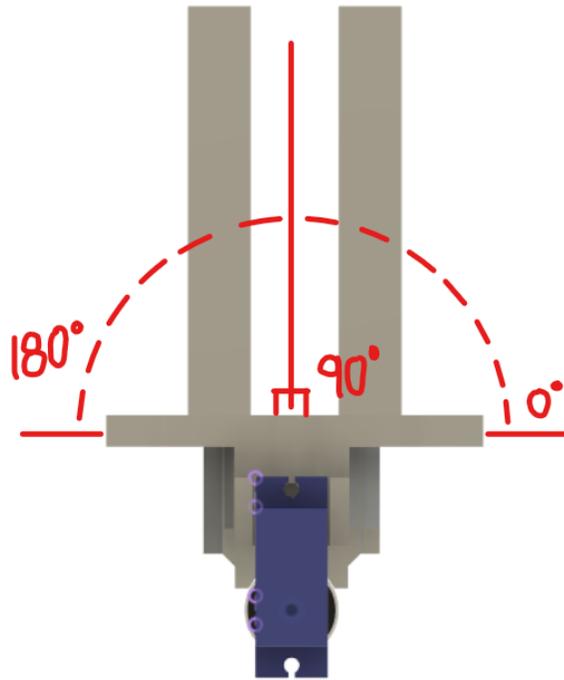


Figura 46: Ejemplo de trayectoria de movimiento 180°

#### 7.4.4. Garra de sujeción

La garra de sujeción en los prototipos anteriores funcionó muy bien por lo que esta pieza no tiene mayor cambio, únicamente se aumentó la longitud de las pinzas de sujeción ya que en los prototipos anteriores el único problema presente era que al momento de sujetar el pallet este tendía a resbalarse o a inclinarse para un lado por lo que la solución a este problema fue aumentar la longitud de las pinzas para que al momento de acercarse a las estanterías esta pudiera sujetar los pallets de una mejor manera.

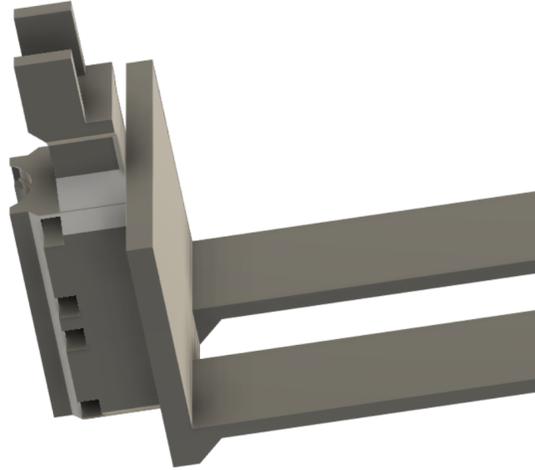


Figura 47: Diseño 3D de garra de sujeción vista 1

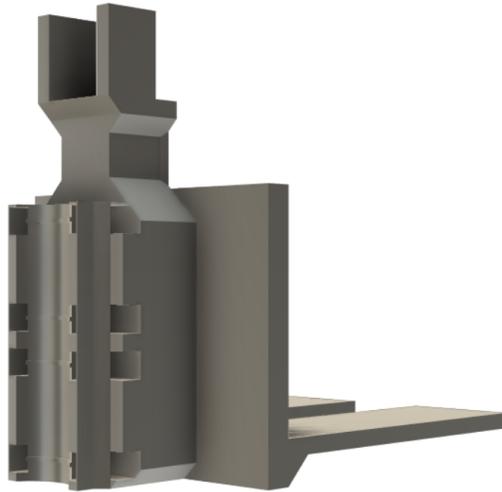


Figura 48: Diseño 3D de garra de sujeción vista 2

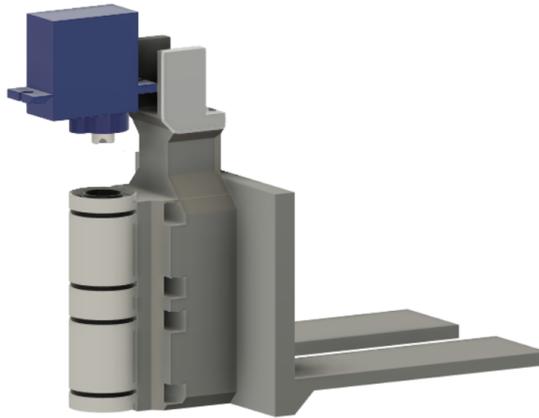


Figura 49: Diseño 3D de garra de sujeción armada

## 7.5. Cálculo de esfuerzos en pinzas de garra

Para cumplir con el objetivo de cargar 500g como carga máxima en los pallets se procedió a hacer un análisis en la zona más crítica del mecanismo de sujeción siendo estas las pinzas de la garra que serán las encargadas de soportar el peso del pallet. El análisis se hizo en una sola pinza siguiendo el concepto de una barra empotrada y la carga que va sobre el pallet se distribuye en toda la superficie de este mismo por lo que se tomó la carga como una carga distribuida a lo largo de una pinza por lo que para convertir los 500 gramos de una carga puntual en una carga distribuida se dividió 500 gramos entre 6.5 cm para trabajar con las dimensionales de gramos y centímetros, dándonos un resultado de una carga distribuida de 77g/cm y donde el resultado se dividirá en dos por ser dos pinzas.

El modelo de análisis y el diagrama de cuerpo libre de las pinzas se muestra a continuación:

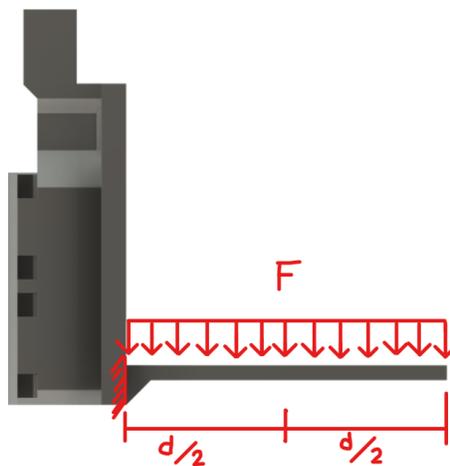


Figura 50: Modelo de análisis de pinza

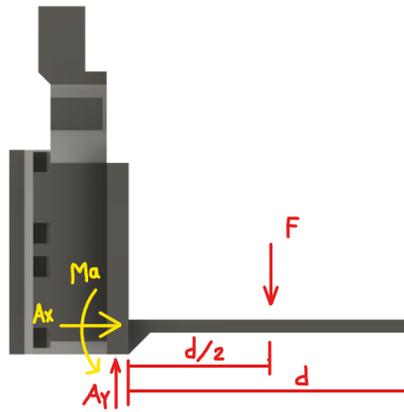


Figura 51: Diagrama de cuerpo libre de pinza

Luego de observar nuestro diagrama de cuerpo libre necesitamos encontrar el momento y nuestras reacciones en los ejes X y Y, como no hay fuerzas que se apliquen en el eje X sabemos que la reacción en dicho eje es igual a cero. Se procedió a hacer sumatoria de momentos tomando el sentido a favor de las agujas del reloj como negativo.

$$\begin{aligned}
 \rightarrow \sum M_a = 0 & & \rightarrow \sum F_Y = 0 \\
 -500 \text{ g}(3.25 \text{ cm}) + M_a = 0 & & A_Y - 500 \text{ g} = 0 \\
 M_a = 1625 \text{ g} * \text{cm} & & A_Y = 500 \text{ g}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Luego procedemos a encontrar las fuerzas internas que posee la estructura para poder diagramar el momento flector de la fuerza cortante y el método que se utilizó fue el método de corte, este consiste en seccionar o dar un corte a la estructura a una distancia X para encontrar las fuerzas internas de la estructura aplicando las tres ecuaciones de equilibrio: sumatoria de fuerzas en X, sumatoria de Fuerzas en Y y sumatoria de momentos como se muestra a continuación.

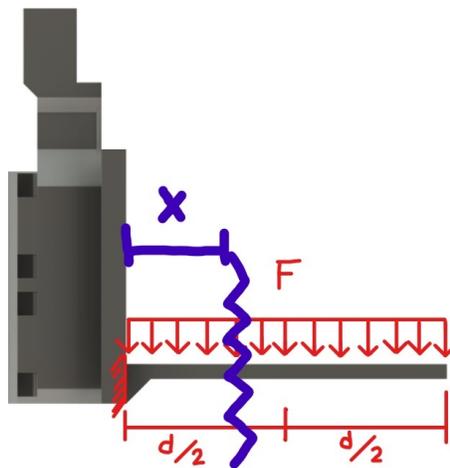


Figura 52: Análisis con metodo de corte

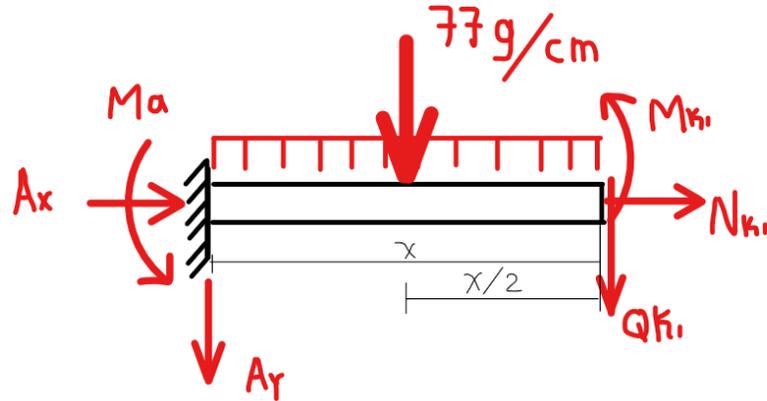


Figura 53: Diagrama de cuerpo libre de fuerzas internas

$$\sum M_i = 0$$

$$1625 \text{ g} \cdot \text{cm} - 500 \text{ g}(x) + 77 \times (x/2) + M_{k_1} = 0 \quad (2)$$

$$M_{K_1} = -1625 \text{ g} \cdot \text{cm} + 500 \text{ g}x - \frac{77x^2}{2}$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$500 \text{ g} - 77x - Q_{r_1} = 0 \quad (3)$$

$$Q_{K_1} = 500 \text{ g} - 77x$$

Luego de obtener las ecuaciones anteriores procedemos a evaluar los valores de la distancia  $x$  entre 0 y 6.5cm para poder obtener las gráficas de esfuerzo cortante y momento. Se utilizó la herramienta Matlab.

$$Q_{k_1} = 500 \text{ g} - 77x$$

$$0 \leq x \leq 6.5 \text{ cm}$$

$$Q_{k_1} = 500 \text{ g} - 77(0)$$

$$x = 0; Q_{k_1} = 500 \text{ g}$$

$$Q_{k_1} = 500 \text{ g} - 77(6.5)$$

$$Q_{k_1} = 0; x = 6.5 \text{ cm}$$

$$M_{k_1} = -1625 \text{ g} \cdot \text{cm} + 500 \text{ g}(0) - \frac{77(0)^2}{2}$$

$$x = 0; M_{k_1} = -1625 \text{ g} \cdot \text{cm}$$

$$M_{k_1} = -1625 \text{ g} \cdot \text{cm} + 500 \text{ g}(6.5 \text{ cm}) - \frac{77(6.5 \text{ cm})^2}{2}$$

$$M_{k_1} = 0 \text{ g} \cdot \text{cm}; x = 6.5 \text{ cm}$$

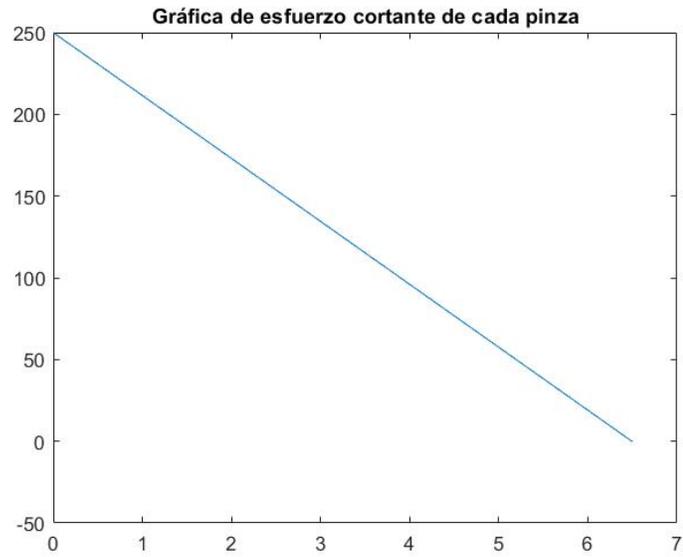


Figura 54: Gráfico de esfuerzo cortante de una pinza

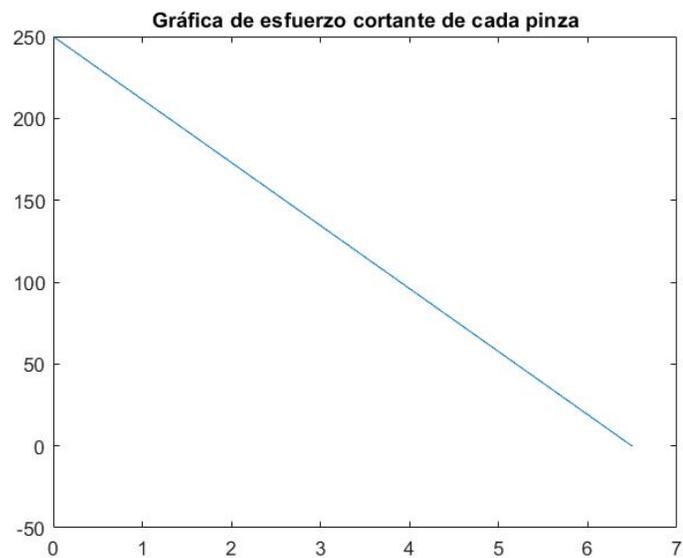


Figura 55: Gráfico de momento de una pinza

Gracias a estos gráficos podemos darnos cuenta de las fuerzas que actúan sobre las pinzas de las garras por lo que para asegurarnos de que puedan soportar los 500 gramos propuestos se les agregó un chafán en la unión de la pinza ya que es la sección crítica de esta pieza.

## 7.6. Control de sistema

Uno de los objetivos principales de este proyecto de graduación es automatizar el proceso de carga y descarga de productos dentro de la bodega a utilizar, por lo que, se necesita de componentes electrónicos y mecánicos capaces de realizar las tareas que un operario hace dentro de la bodega de forma automática. Para el desarrollo y control del prototipo final se utilizaron motores para efectuar los movimientos del sistema de sujeción y una placa Arduino Mega leer y enviar datos a los motores por medio del software de programación Arduino. Para controlar el sistema de sujeción se utilizó una placa Arduino Mega que se comunica mediante Bluetooth a otra placa de Arduino mientras sigue las instrucciones que se envían desde la computadora central. Para el sistema se utilizó una PCB que se situó justo encima del Arduino Mega, en esta se incorporaron los demás componentes del circuito y es en donde todo el cableado del sistema se conecta.

## 7.7. Software

### 7.7.1. Arduino

Para el software se programaron las rutinas de cada parte del sistema de sujeción en la interfaz de Arduino, empleando lenguaje de programación C. El sistema de sujeción realiza su procedimiento dependiendo de los movimientos que realizan las otras partes del sistema por lo que se trabajó utilizando variables globales que sirven como banderas y a la hora de activar cada una de estas banderas se procede a hacer un movimiento o ya sea a detenerlo. [11]

## 7.8. Hardware

### 7.8.1. Arduino Mega

La marca Arduino tiene una variedad de presentaciones en sus productos de placas electrónicas por lo que se realizó un análisis de las características que cada presentación tenía y mediante la comparación de cuál presentación se adecuaba más al proyecto se hizo una elección, el sistema automatizado del transelevador necesita controlar varios elementos como servo motores, sensores y encoders por lo que se necesitaban muchas entradas y salidas digitales y analógicas, es por eso que se escogió un Arduino Mega. El Arduino Mega cuenta con 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 15 pueden ser usadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs, un cristal de 16Mhz, conexión USB, jack para alimentación DC, conector ICSP, y un botón de reseteo. La placa Mega 2560 es compatible con la mayoría de shields compatibles para Arduino UNO. [18]



Figura 56: Arduino mega

18

### 7.8.2. PCB

Para reunir todo el cableado del circuito del sistema se fabricó una PCB en donde se incorporaron todos los componentes del circuito que involucraban el movimiento vertical y el mecanismo de sujeción, esta PCB se conecta directamente con el controlador que envía las señales al sistema (Arduino Mega), el principal objetivo de fabricar una PCB es porque esto permite que el cableado sea más compacto y ayuda a que los cables se centren en un único lugar evitando que el mecanismo tenga interferencia de cables en cualquier movimiento, también el implementar una PCB nos permite evitar falsos contactos o desconexiones de cables involuntarias ya que se fueron soldadas a esta y para los componentes se utilizaron headers para conectarlos ya que estos por motivos de mantenimiento o de remplazo es importante poder retirarlos y colocarlo fácilmente sin dañar la placa.



Figura 57: Placa fabricada

[18]

Para la fabricación de la PCB se debieron de tomar en cuenta factores como el consumo de corriente máximo de los componentes a utilizar, siendo el caso del sistema de sujeción, los servo-motores MG90S que se utilizaron se midieron en funcionamiento y el consumo máximo que estos llegaron a presentar fue de 0.9 amperios y el consumo regular de 0.6 amperios, estos consumen menos amperaje que el motor Nema que se utilizó para el movimiento vertical del transelevador por lo que, para decidir el grosor de las pistas de las conexiones de estos servos en la placa se utilizó el mismo grosor de pistas que el motor Nema de la parte del movimiento vertical como se muestra en la tesis [19]

### 7.8.3. Servomotores MG90S(prototipo final)

Con la retroalimentación de los primeros servomotores utilizados SG90, se decidió utilizar servomotores con un torque mayor y con materiales mucho más resistentes ya que los engranes de plástico no soportaban el efecto de palanca haciendo que estos se sobaran o no pudieran efectuar el movimiento necesario por lo que, a comparación de los SG90 los servomotores MG90 pesan un poco más (14 g) y estos varían un poco de tamaño siendo los MG90 un poco más grandes en dimensiones que los SG90 y estos tienen engranajes de metal en lugar de plástico. El MG90S también es un poco más rápido que el SG90 y tienen un torque mayor, el torque del SG90 es de 1.8 kgf\*cm mientras que el del MG90 es de 2.2kgf\*cm. [20]

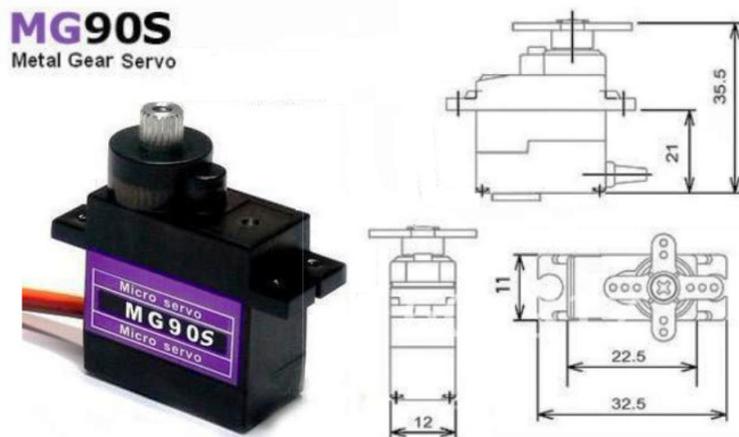


Figura 58: Arduino mega

20

#### 7.8.4. Servomotores MG996R(tercer prototipo)

El Servomotor TowerPro MG996Res un servo con alto Torque de hasta 11Kg-cm. Cuenta con un diseño robusto, de alto rendimiento, tamaño estándar y cuenta con engranes de metal que lo hace mas resistente a comparación de otros servos que trabajan con engranes de plástico por lo que en su momento fue una buena opción para aplicar en el proyecto ya que brindaba un buen torque y una buena resistencia. 14

### MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo

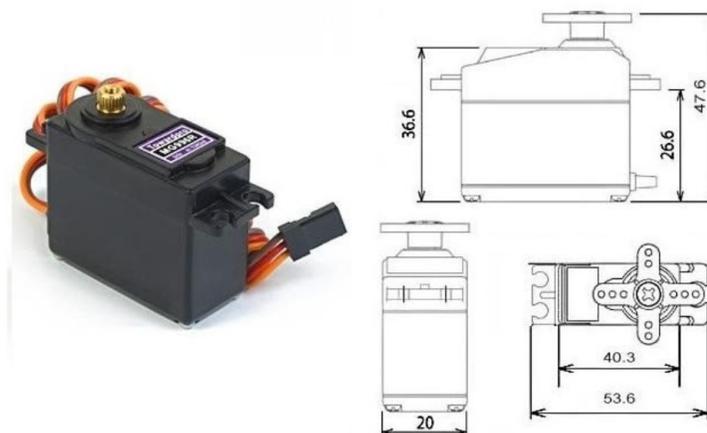


Figura 59: Servo-motor MG996R

14

### 8.1. Diseño 3D

El modelo 3D del sistema de sujeción completo nos muestra la previsualización del prototipo la cual representa una muy buena aproximación al prototipo ya fabricado, esto es de gran ayuda para poder ver y analizar los movimientos que puede hacer el sistema y poder identificar errores antes de fabricar las piezas.

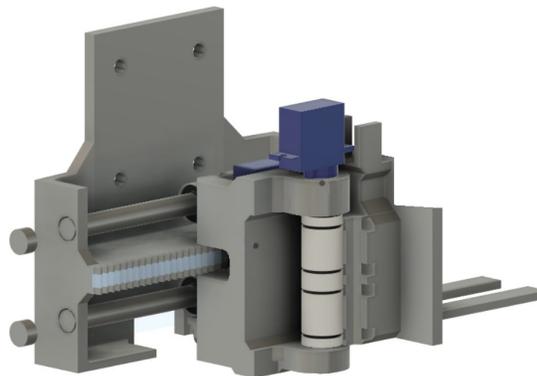


Figura 60: Diseño 3D de sistema de sujeción ensamblado vista 1



Figura 61: Diseño 3D de sistema de sujeción ensamblado vista 2

Luego de fabricar las piezas y ensamblar todas las partes con motores y las cinchas de amarre podemos observar el prototipo final del sistema de sujeción totalmente ensamblado y listo para unirse al sistema completo del transelevador automatizado.

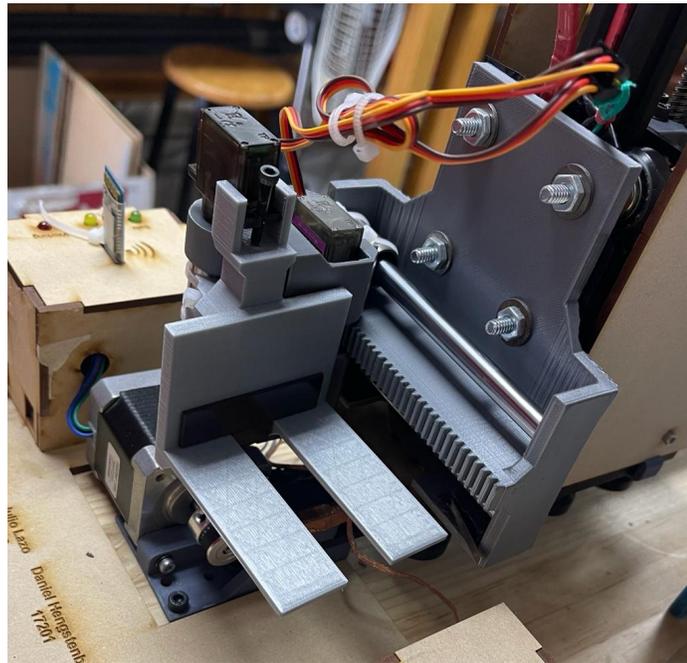


Figura 62: Ensamble de mecanismo de sujeción a sistema completo

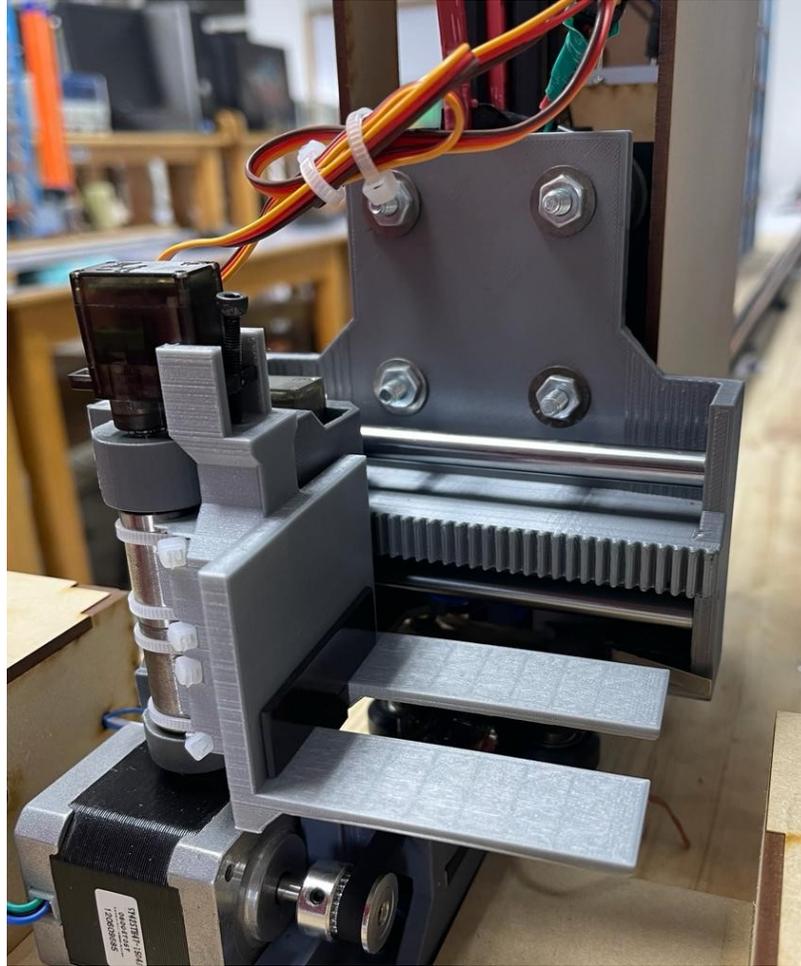
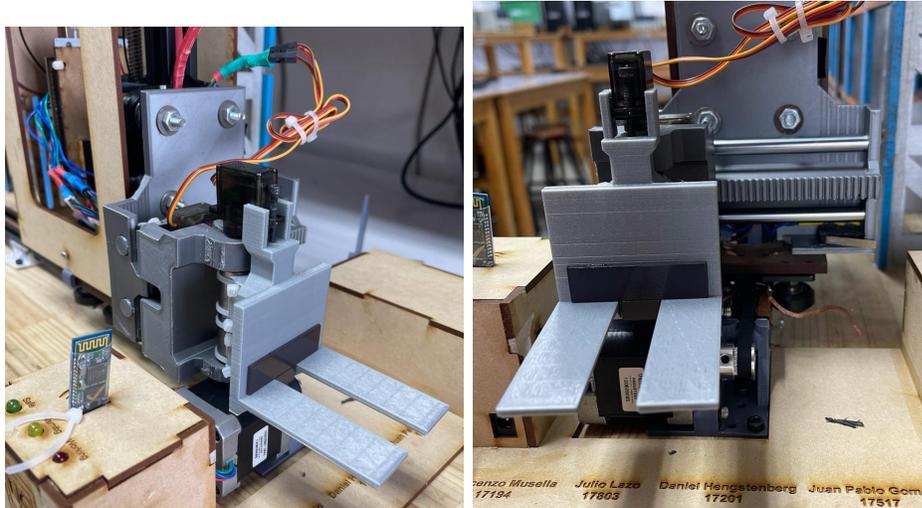


Figura 63: Ensamble de mecanismo de sujeción a sistema completo

A continuación, se puede observar el sistema de sujeción ensamblado a las demás partes del transelevador automatizado, uniéndose a la mono columna mediante un conjunto de 4 tornillos M3 que sujetan el acople de movimiento horizontal a una placa de metal que cuenta con una serie de ruedas que son parte del sistema de movimiento vertical.

Los motores y finales de carrera del sistema de sujeción se conectaron directamente a la PCB situada sobre el Arduino Mega, los cables se agruparon mediante tubos de hule termo encogibles para hacer el cableado más compacto y no interferir con los movimientos del sistema, estos se situaron en la parte trasera del acople de movimiento vertical justo entre esta pieza y el riel de la mono columna.



(a) Vista 1

(b) Vista 2

Figura 64: Múltiples imágenes

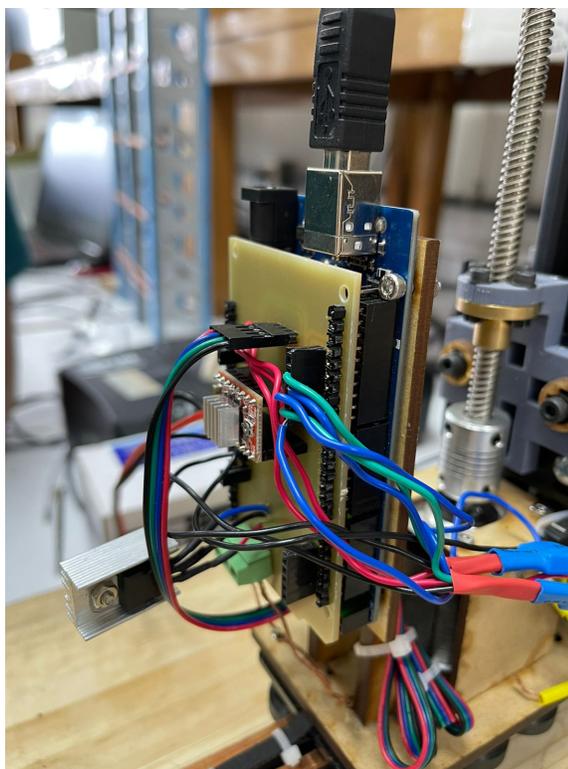


Figura 65: PCB ensamblada y conectada

Luego podemos observar que la garra efectivamente puede tomar pallets incluso en la carga máxima propuesta que son 500 gramos, para estas pruebas se colocó plastilina en un total de 500 gramos para simulando una carga pesada como se muestra a continuación.



Figura 66: Pallet con carga máxima en balanza, peso: 500.2g

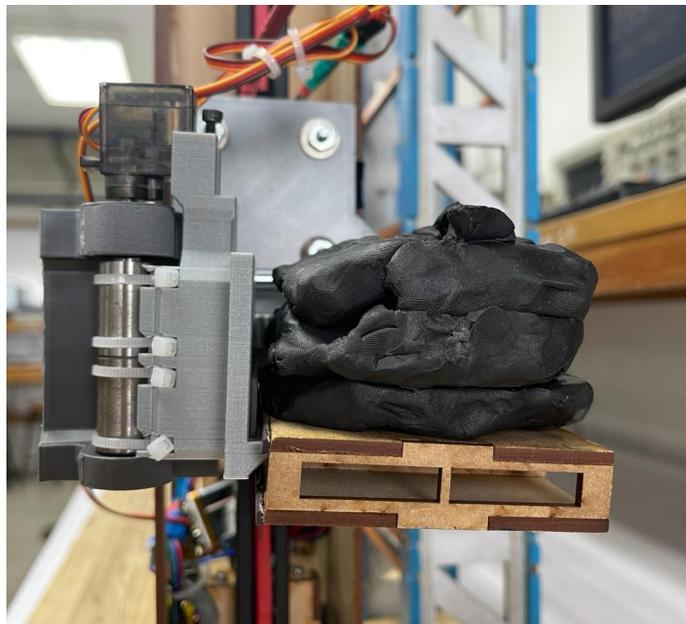


Figura 67: Sistema de sujeción cargando pallet con carga máxima vista 1

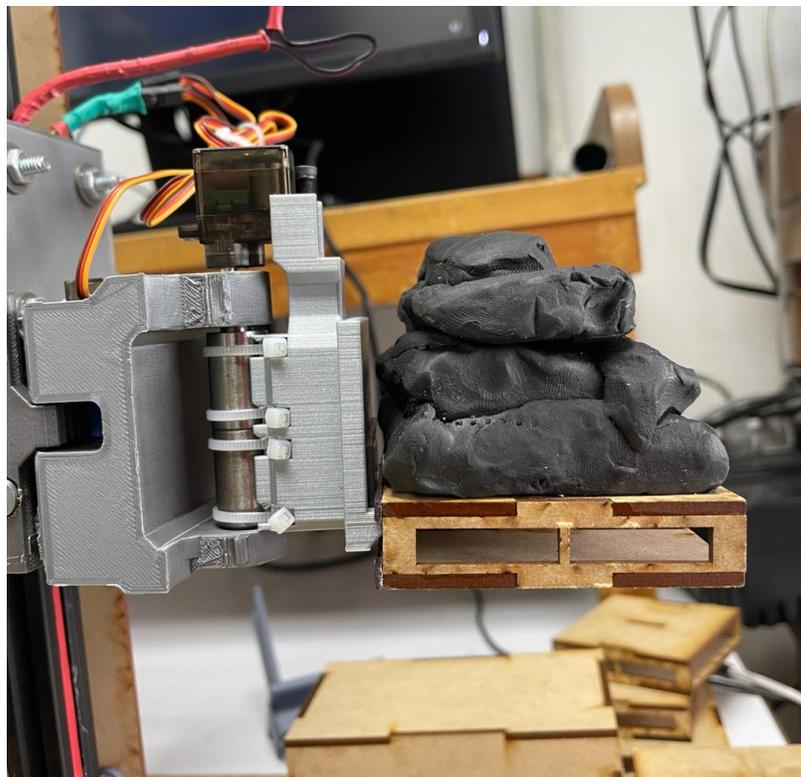


Figura 68: Sistema de sujeción cargando pallet con carga máxima vista 2

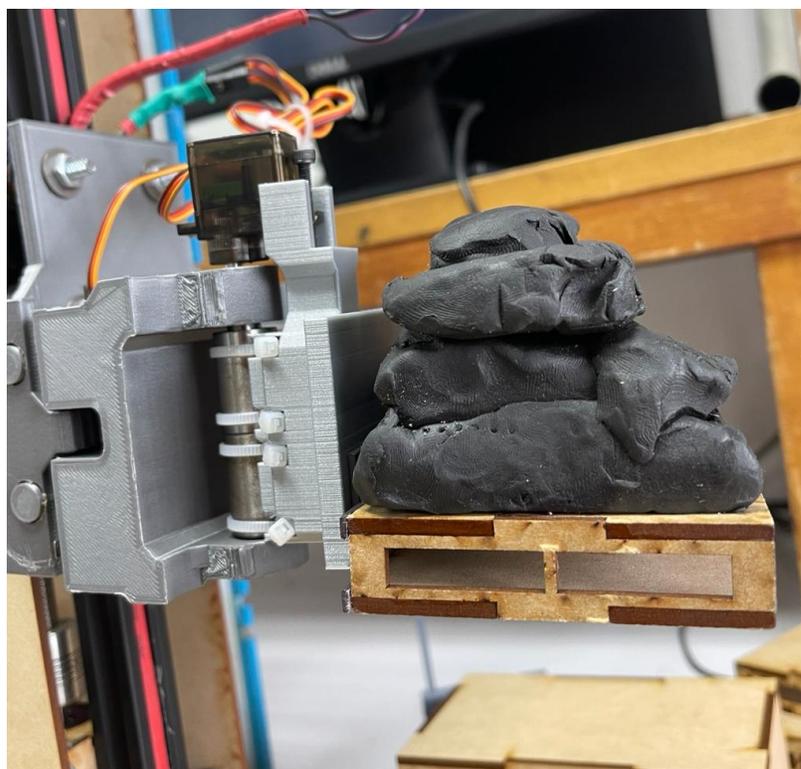


Figura 69: Sistema de sujeción cargando pallet con carga máxima vista 3

La garra de sujeción al momento de adquirir un pallet lo mantiene en la garra, aunque por el accionamiento de las partes verticales y horizontales, este algunas veces tiende a moverse un poco por lo que para resolver esto se utilizaron una serie de imanes livianos tanto en los pallets como en la garra para poder asegurar las cargas y evitar movimientos no deseados, en las máquinas reales esto no sucede ya que se trata con cargas más pesadas que evitan que se mueva fácilmente el pallet.

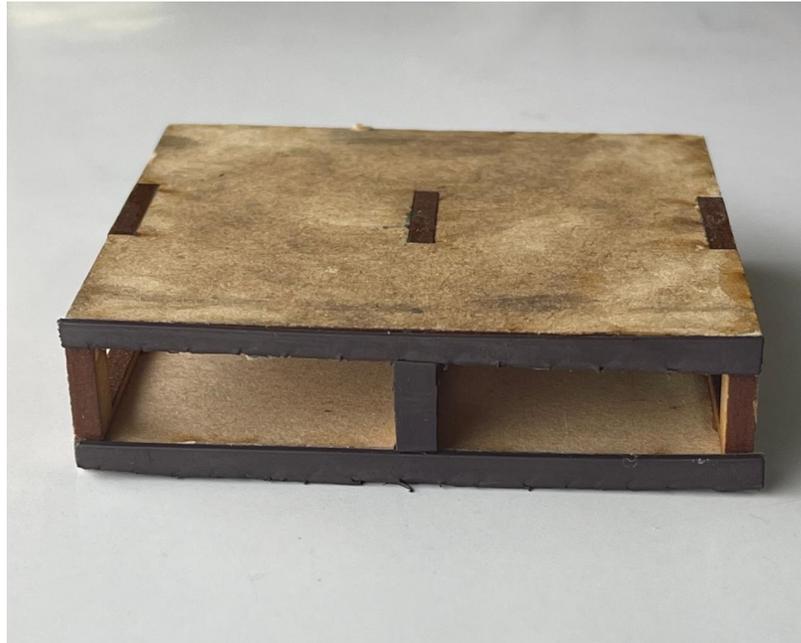


Figura 70: Pallet con imanes vista 1

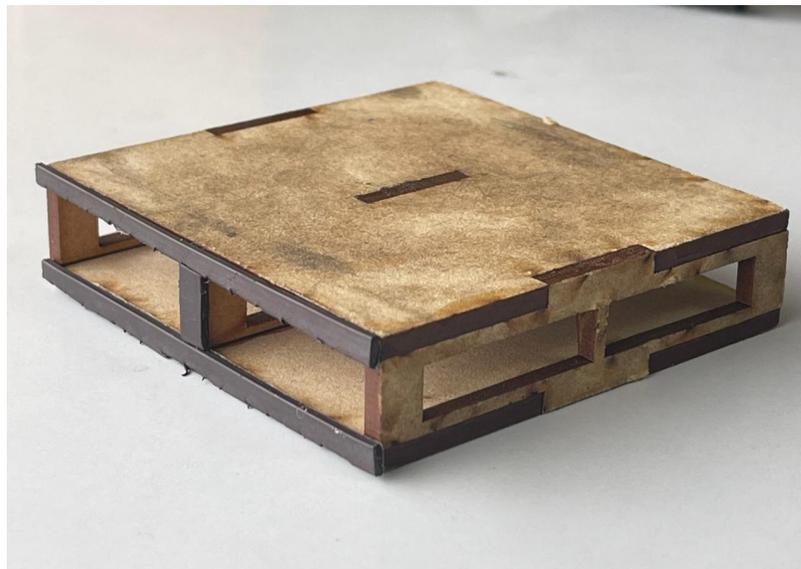


Figura 71: Pallet con imanes vista 2

## 8.2. Análisis de garra de sujeción

Se realizó un análisis de tensión en la garra mediante la herramienta de diseño Fusion 360, en donde se ubicaron los apoyos de la pieza justo en la unión con los cojinetes lineales de donde se sostiene la garra y también se agregó la carga ( $600g = 5.884N$ ) en el área de las pinzas para poder obtener el resultado del análisis, a continuación, se muestran las imágenes de los resultados del análisis de estrés, de desplazamiento, de reacción y de deformación. Estos resultados muestran la pieza con colores de azul a rojo en donde azul significa que no recibe mucho esfuerzo mientras que mientras más rojo sea significa que sufre de más esfuerzo.

En la siguiente figura se muestra el análisis nos muestra la representación del estrés que la pieza sufre al ser sometida a la carga mientras esta se encuentra ensamblada, aquí podemos ver la distribución que la carga está teniendo a través de la pieza y vemos que en la zona de la unión de las pinzas se concentra el mayor estrés, siendo esta la parte más frágil de la pieza y justo en el área que se muestra con color rojo es el lugar en donde la pieza fallaría en dado caso superara los límites de la pieza.

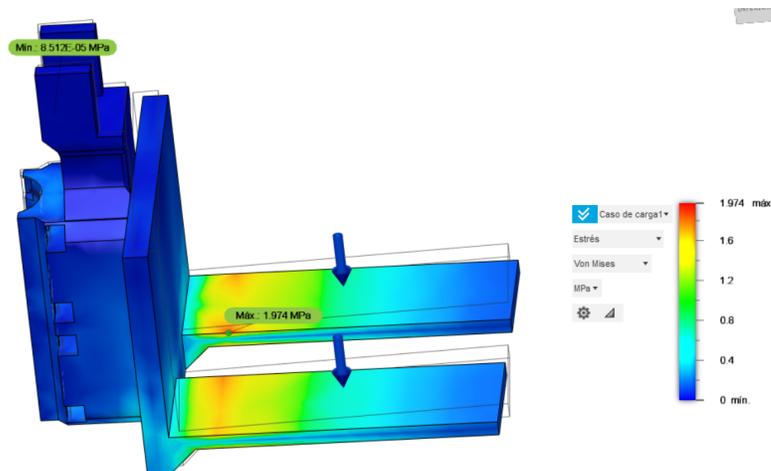


Figura 72: Análisis de estrés de garra de sujeción

En la siguiente figura podemos observar el resultado del análisis de desplazamiento en donde se muestra la zona roja ubicada en la punta de las pinzas de la garra, esto nos muestra que, al realizar el movimiento de 180 grados, la parte que más sufre un esfuerzo son estas áreas justo al punto de las pinzas, esto se debe a que son el punto más alejado al pivote de giro por lo que el torque y el momento de inercia aumenta mientras más se encuentra alejado de este.

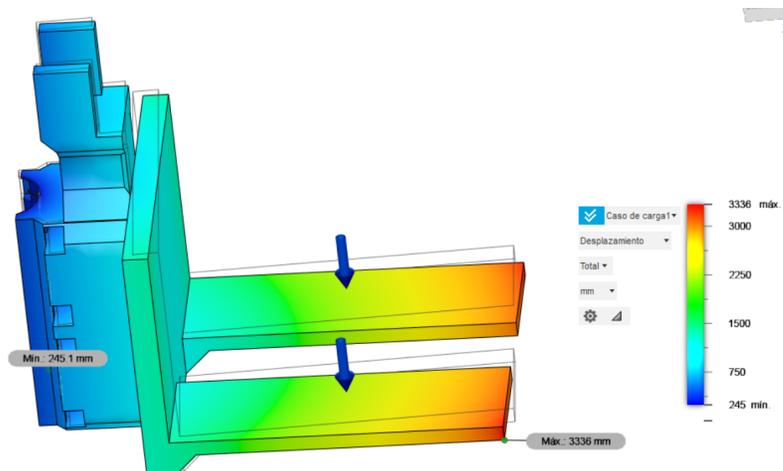


Figura 73: Análisis de desplazamiento de garra de sujeción

Para el análisis de reacción de la garra se ubicaron los puntos de apoyo en donde se une la garra al resto del ensamblaje del mecanismo de sujeción que son los cojinetes lineales y al ver la figura del resultado vemos que los puntos de contacto entre la garra con los cojinetes lineales son los que se ven afectados por un esfuerzo de reacción ya que son los únicos puntos que están en contacto además de los pallets al momento de cargarlos pero en este análisis únicamente se tomó en cuenta el punto de apoyo para poder ver el esfuerzo de reacción que sufría la pieza sin pallet.

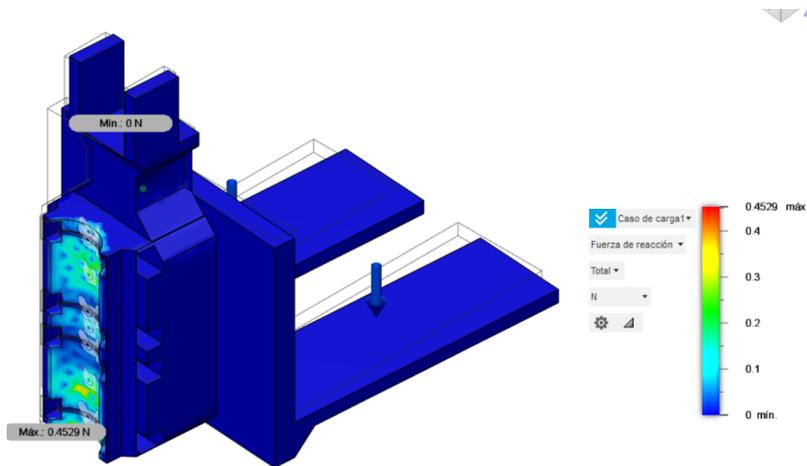


Figura 74: Análisis de reacción de garra de sujeción

En el análisis de deformación de la garra podemos observar que es muy similar a la figura del análisis de estrés, y se debe a que la parte que más está propensa a deformarse es la parte que sede primero y es por eso por lo que se muestra que en otras partes existen pequeñas posibilidades de deformación, pero en el punto de ruptura es en donde más deformación habrá.

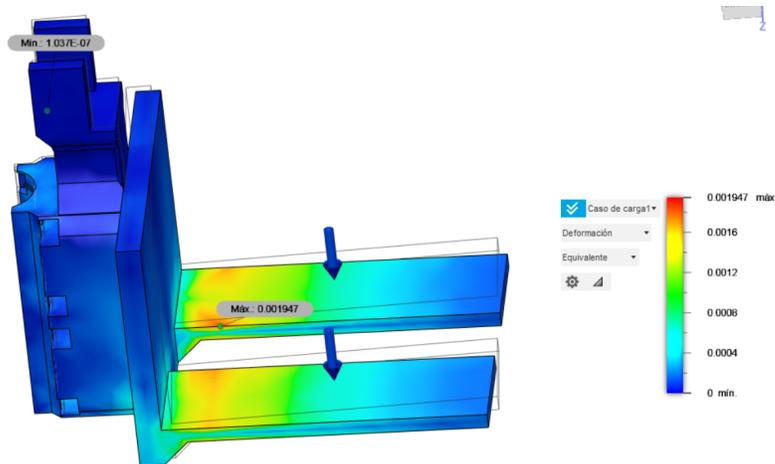


Figura 75: Análisis de deformación de garra de sujeción

### 8.3. Imágenes de transelevador automático completo

Esta es la presentación final del prototipo del transelevador automático para la bodega de Grupo Roca Fuerte, se ensamblaron todas las partes del proyecto tales como el sistema de movimiento horizontal, el sistema de movimiento vertical, sistema de sujeción de cargas y la comunicación inalámbrica. Se utilizó material mdf para fabricar con cortadora láser para fabricar con cortadora láser la carcasa que cubre los mecanismos internos del prototipo, así como también, el área de despacho mediante una plataforma simple que será el área en donde el transelevador dejará y sujetará los pallets que se soliciten. Para la comunicación se utilizaron dos arduinos siendo uno el master y otro el slave y se comunican mediante bluetooth y recibiendo datos a través de comunicación serial, el motor del sistema de movimiento horizontal funciona como el arduino master, se muestra en la siguiente figura ensamblado a la carcasa.

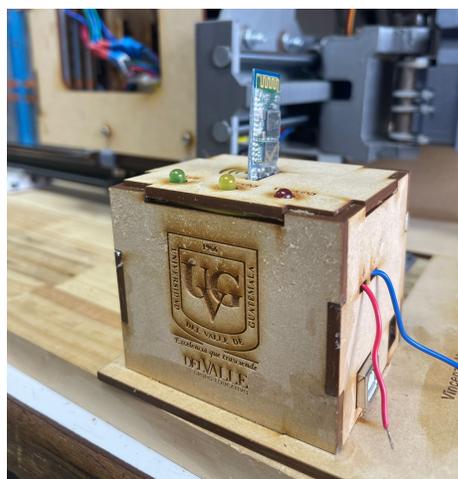
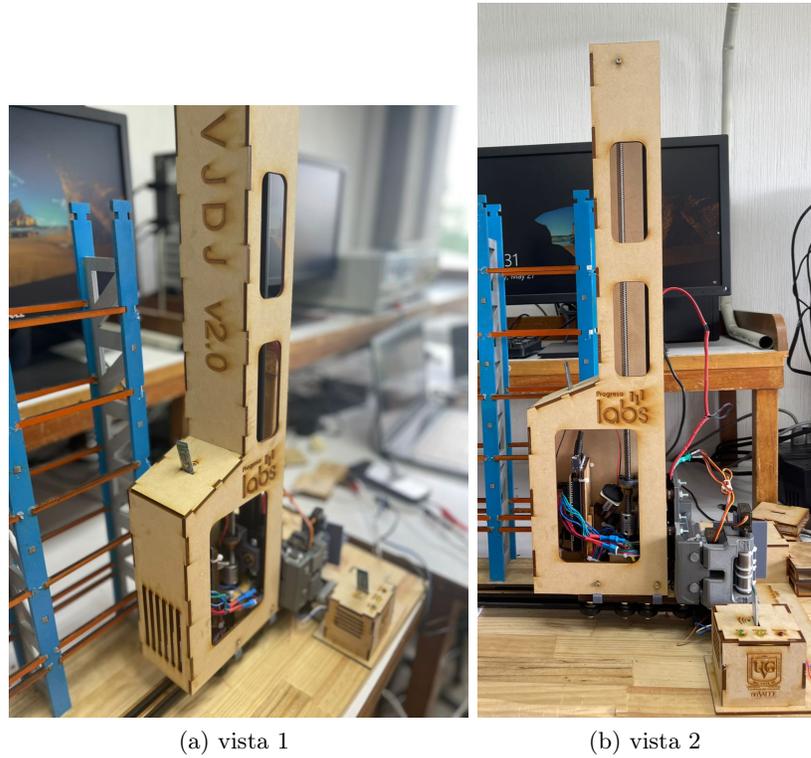


Figura 76: Arduino máster de transelevador



(a) vista 1

(b) vista 2

Figura 77: Mono columna

El arduino slave es el encargado de enviar señales tanto al motor del sistema de movimiento horizontal como a los dos servo motores del sistema de sujeción de cargas, este arduino se encuentra dentro de la mono columna con su respectivo módulo bluetooth.

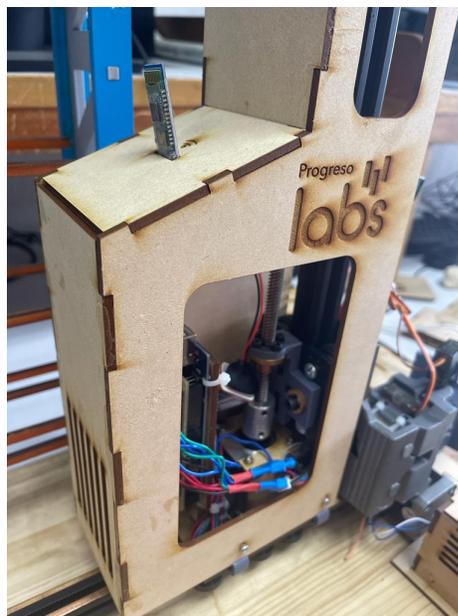


Figura 78: Interior de mono columna



Figura 79: Mono columna vista 2

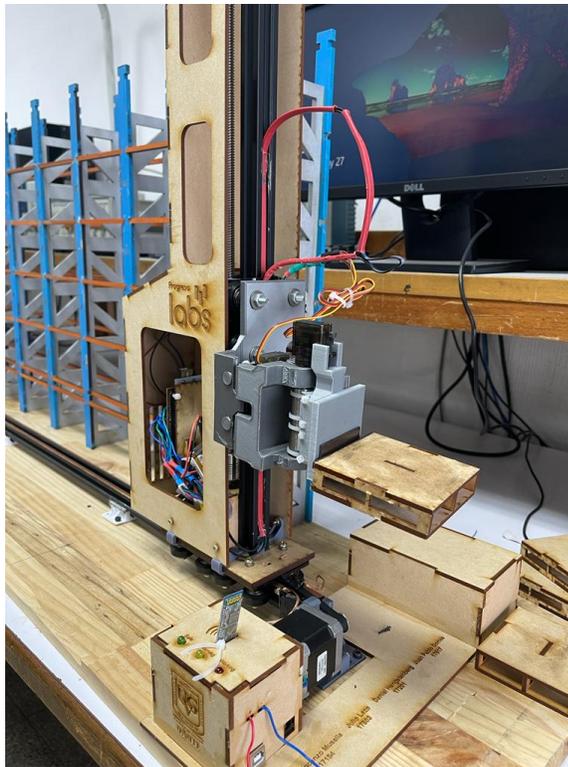


Figura 80: Ensemble completo



Figura 81: Ensemble completo colocando pallet

## 8.4. Estimación de cotización de prototipo para escala real

En la estimación para la cotización de los componentes a utilizar en la máquina real se hizo una selección de estos y a continuación se muestra una pequeña descripción de cada componente.

### 8.4.1. Servo actuador

Este es un servo motor trifásico de marca china llamada Oulu y cuenta con un torque de 43NM y una potencia de 6.7kW y es una marca muy utilizada dentro de la industria produciendo la empresa 50,000 unidades por año. [\[21\]](#)



Figura 82: Servo actuador

### 8.4.2. Servo driver

Este es el driver para poder utilizar el servo actuador el cual se conecta directamente con el PLC y enviará las señales correspondientes al servo actuador para hacer la rutina requerida, este cuenta con una respuesta de frecuencia de 2.3kHz y es de la marca Panasonic. [\[22\]](#)



Figura 83: Servo driver

22

### 8.4.3. Motor reductor

El motor reductor es el encargado del movimiento horizontal accionando el piñón y moviendo el mecanismo hacia las estanterías, este motor reductor cuenta con tres niveles de velocidad, trabaja en frecuencias entre 50Hz y 60Hz y una potencia de 7.5kW. 23



Figura 84: Motor reductor

23

### 8.4.4. Piñón

El piñón es el encargado de transmitir la potencia del motor reductor hacia la cremallera y realizar el movimiento horizontal. 24



Figura 85: Piñón

24

#### 8.4.5. Cremallera

La cremallera es la encargada de provocar el torque para que el mecanismo se mueva horizontalmente tanto para la estantería derecha como para la izquierda. 25

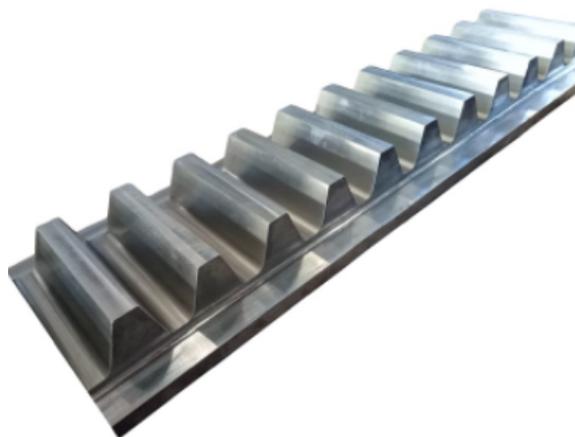


Figura 86: Cremallera

25

#### 8.4.6. Acero

Para la estructura del mecanismo de sujeción se escogió el material del acero ya que este material es muy utilizado para fabricaciones de piezas de la misma industria y suelen ser muy efectivas, para esto se dio un estimado de 1500kg de acero para todo el mecanismo

de sujeción y se tomó como referencia un precio desde un proveedor de china de \$5.90 por kilogramo. [26]

#### 8.4.7. PLC

El PLC será el encargado de recibir toda la información que se envíe desde la computadora central y este será el que envía las señales hacia los componentes necesarios para que los movimientos adecuados se efectúen, se escogió la marca Siemens ya que esta es muy utilizada y de muy buena calidad en el mercado. Este cuenta con mpi, cuatro contadores de 60Hz y una interfaz integrada rs485. [27]



Figura 87: PLC

[27]

#### 8.4.8. Tablero

El tablero servirá únicamente para almacenar el PLC y reunir todas las conexiones en un mismo lugar por lo que se escogió uno de la misma marca del PLC siendo este un Siemens. [28]



Figura 88: Tablero

28

#### 8.4.9. Final de carrera

Para estos se cotizaron dos y son los encargados de mandar las señales de tope para el movimiento horizontal del sistema y operan a una fuerza de 11.8N. 29



Series Image - may not be reflective of part number  
Las imágenes publicadas son meramente ilustrativas

Figura 89: Final de carrera

29

#### 8.4.10. Módulo Wi-Fi

Este es el encargado de hacer la comunicación entre el PLC con la computadora central, este módulo cuenta con potencia de transmisión de 300mW, fácil de cubrir escenas de 100m y programación inalámbrica. [30](#)



Figura 90: Módulo Wi-Fi

[30](#)

#### 8.4.11. Sensor de vibración

Este es capaz de detectar las vibraciones en el sistema en caso de cualquier situación de peligro o de incertidumbre en el proceso, este cuenta con un overload de 120%, una capacitancia de 6pF y una frecuencia de resonancia de 45kHz. [31](#)



Figura 91: Sensor de vibración

[31](#)

#### 8.4.12. Fuente de alimentación 24V

Esta fuente seleccionada es de la marca Siemens cuenta con entradas AC 120/230V y a la salida produce DC 24 V/10 A. [32](#)



Figura 92: Fuente de alimentación 24V

[32](#)

#### 8.4.13. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia es el encargado de enviar las señales correspondientes al motor reductor para que haga la rutina necesaria de la forma adecuada, este es un convertidor de frecuencia para 7.5kW y cuenta con dos entradas analógicas, seis entradas digitales, dos salidas análogas, tres salidas de relé. [33](#)



Figura 93: Variador de frecuencia

[33](#)

#### 8.4.14. Sensor de presencia

Este sensor es para detectar si en el recorrido del mecanismo de sujeción se encuentra algún obstáculo y advertir antes de provocar algún accidente, este cuenta con un tiempo de respuesta de 45microsegundos y trabaja entre 10/30V en corriente directa. [34](#)



Figura 94: Sensor de presencia

[34](#)

#### 8.4.15. Scanner

Este scanner sirve para obtener la información de los tags de cada posición de la estantería y enviar datos a la computadora del proceso y las estanterías vacías o con productos. Este scanner cuenta con un lector de código fijo y lee códigos QR. [35](#)



Figura 95: Scanner

[35](#)

Cotización mecanismo de sujeción				
Cantidad	Producto	Marca	Modelo	Precio
1	Servo actuador	Oulu	ZF1815-6.7-43	\$487.00 [21]
1	Servo diver	Panasonic	Mbdht2510e	\$192.00 [22]
1	Motor reductor	WNM	YD2-132M-4/2 6.5/8KW <sub>7</sub> 1450/2880RPM	\$5,000.00 [23]
1	Piñón	-	Piñón High Performance	\$795.00 [24]
1	Cremallera	-	Cremallera High Performance	\$782.00 [25]
1500kg	acero	-	-	\$8,846.00 [26]
1	PLC	Siemens	S7-300 6ES7314-6BH04-0AB0	\$2,026.00 [27]
1	Tablero	CHZIRI	-	\$782.00 [28]
2	Final de carrera	Azbil	LJA10-13A21N	\$147.00 [29]
2	Modulo Wi-Fi	Hecho en China	P LCOM E	\$172.00 [30]
1	Sensor de vibraciones	Hangjia	Ja1N100	\$244.00 [31]
1	Fuente de alimentación 24V	Siemens	6EP1334-2BA201a	\$137.00 [32]
1	Variador de Frecuencia	Siemens	MICROMASTER 440 7.5kW/11kW 400V	\$4,555.00 [33]
1	Sensor presencia	Mark Eye	MEP45WL	\$142.00 [34]
1	Scanner	Datalogic	Matrix220	\$1,300.00 [35]
-	Cableado Eléctrico	-	-	\$2,000.00
-	Mano de obra	-	-	\$84,870.00
Total	-	-	-	\$112,477.00

Cuadro 2: Estimación de precios para la cotización de construcción de máquina en tamaño real

Para la cotización mostrada anteriormente se trabajó utilizando el listado de componentes que se usaría para fabricar el sistema de sujeción de cargas en tamaño real haciendo un estimado del precio de dichos componentes y materiales para dar un aproximado del precio que costaría construir dicho sistema en escala real, para el material utilizado se hizo una estimación de una cantidad de material para dar un aproximado a la escala real. Todos estos precios son únicamente estimaciones para dar una idea del precio real ya que los proveedores de estos componentes no brindan cotizaciones a usuarios particulares por lo que las referencias son obtenidas de internet. A continuación, se presenta un esquema eléctrico general de lo que sería la máquina real y la conexión de esta se muestra en el siguiente diagrama eléctrico.

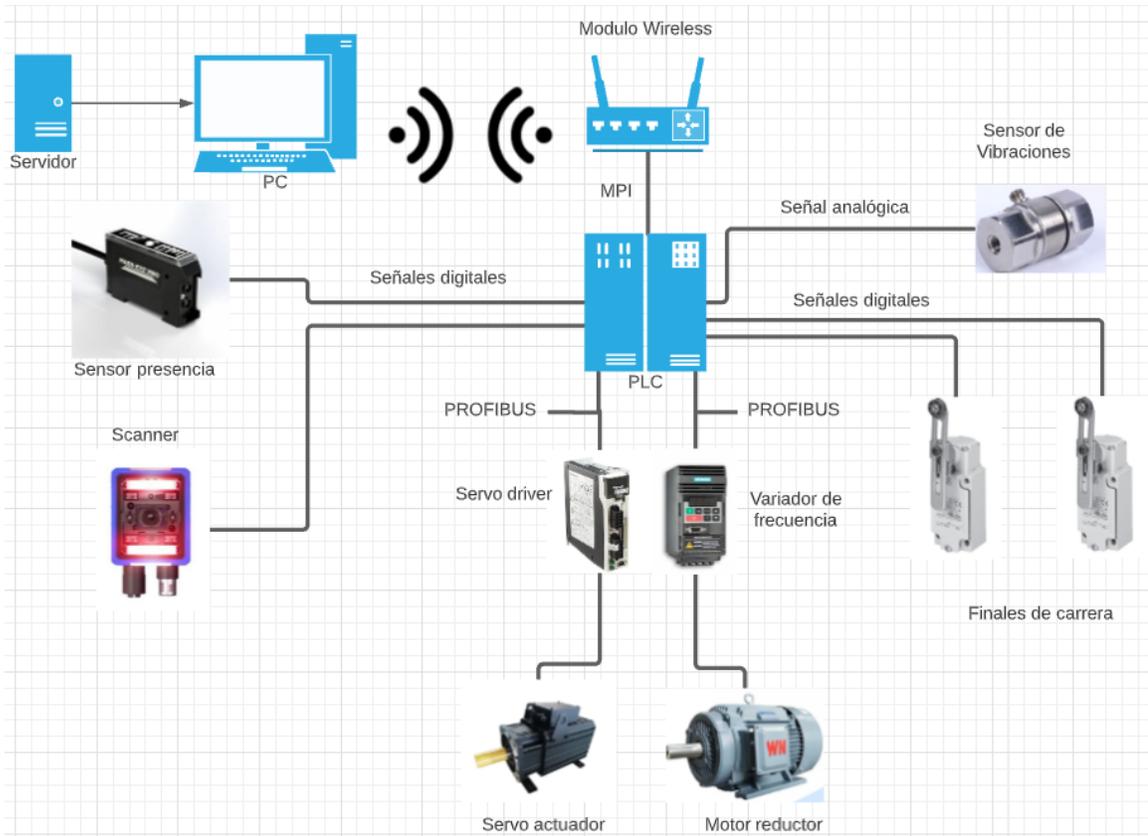


Figura 96: Diagrama eléctrico máquina real

Para la construcción de la máquina real se hizo una estimación de la cotización de la máquina con todas sus partes en la que se da un precio aproximado de la máquina completa que se muestra a continuación.

<b>Cotización general</b>		
<b>Cantidad</b>	<b>Producto</b>	<b>Precio (USD)</b>
1	PLC Siemens S7 300	\$ 2,076.54
1	Sensor de distancia Jenoptik	\$ 5,500.00
4	Encoder incremental rotativo	\$ 608.80
1	Fuente de alimentación 24V Siemens	\$ 138.84
6	Final de carrera	\$ 450.00
1	Módulo Wi-Fi MPI	\$ 175.31
3	Sensor de Vibraciones	\$ 750.00
3	Termisor	\$ 90.00
3	Caja reductora	\$ 22,152.59
3	Variador de frecuencia	\$ 33,192.63
1	Servo actuador	\$ 487.00
3	Motor trifásico AC	\$ 17,100.00
1	Servo driver	\$ 192.00
1	Scanner	\$ 1,300.00
-	Estructuras de acero	\$ 26,027.00
-	Piezas y materiales de bajo costo	\$ 15,000.00
-	Programa de comunicación	\$ 3,000.00
-	API Azure	\$ 2,849.52
1	Ordenador de escritorio Industrial	\$ 2,585.97
1	Router Cisco	\$ 1,454.00
1	Pantalla SIMATIC	\$ 620.00
	Subtotal	\$ 136,396.20
	Costo de envío y transportación	\$ 34,100.00
	Mano de obra	\$ 297,531.34
	Instalación	\$ 36,900.00
	Impuestos	\$ 60,591.30
	<b>Total</b>	<b>\$ 565,518.84</b>

Cuadro 3: Tabla de cotización general

#### **8.4.16. Diagrama de flujo de lógica de código**

Para la construcción del código de la programación en Arduino de todo el transelevador primero se realizó un diagrama de flujo en donde se pueden apreciar los pasos y las rutinas que se deben de cumplir para que el transelevador haga el procedimiento adecuadamente. El funcionamiento del transelevador automático consta de dos rutinas tales como recolectar pallets y colocar pallets. A continuación, se muestra una breve descripción de cada rutina:

##### **Rutina colocar pallets**

Esta consiste en el funcionamiento del transelevador desde que se encuentra en el punto base empezando en sujetar un pallet desde el despacho y trasladándolo y colocándolo en la posición solicitada en la estantería para luego regresar al punto base y quedar en espera de una nueva instrucción.

##### **Rutina recolectar pallets**

Esta rutina consiste en el funcionamiento del transelevador desde que se le solicita recolectar un pallet en una posición específica de la estantería trasladándose hasta el lugar y recolectando el pallet para luego llevarlo al área de despacho, despacharlo y luego esperar en el punto base para otra nueva instrucción.

En la sección de anexos se encuentran los diagramas de flujo de cada rutina.

- El movimiento horizontal del prototipo final que utiliza varillas como ejes y cojinetes lineales es mucho más suave y preciso que los rieles de PLA de los prototipos 2 y 3.
- La garra es capaz de soportar pallets con la carga máxima de 500 gramos efectivamente, es capaz de soportar cargas de hasta 600 gramos, pero no es recomendable ya que las pinzas al ser de PLA pueden doblarse e incluso quebrarse ya que este material no es muy resistente a la flexión.
- El sistema diseñado es capaz de sujetar y colocar cargas de ambas estanterías mediante su sistema de giro de 180° y el desplazamiento horizontal mediante el riel.
- El sistema recolecta y coloca pallets de una manera estable sin comprometer el equilibrio de todo el mecanismo.
- El sistema de sujeción diseñado es compatible con las demás partes del sistema automatizado de transelevador permitiendo trabajar en conjunto para el correcto funcionamiento del prototipo.
- El modelo 3D del sistema de sujeción muestra una visualización a escala del sistema ensamblado y de los movimientos que este realizará, con este modelo se pudo identificar limitaciones de movimiento o errores de diseño lo cual permitió editarlos antes de fabricar las piezas y al mismo tiempo se puede apreciar cómo sería el prototipo ya físico.
- El efectivo movimiento horizontal del mecanismo de sujeción reduce significativamente la fricción entre las piezas y hace que el piñón y la cremallera tengan un buen contacto por lo que se necesitó de una menor fuerza para movilizar el mecanismo utilizando el motor MG90S en lugar del motor más fuerte MG996R.
- La cremallera y el piñón hacen un contacto muy bueno, sin embargo, al ser impresos en 3D cuentan con una pequeña incertidumbre de imprecisión a comparación de fabricarlos con materiales como aluminio y utilizando otro proceso de fabricación más preciso.

- El algoritmo de programación del sistema de sujeción se comunica correctamente con la computadora central inalámbricamente y realiza las rutinas deseadas de igual forma.

---

### Recomendaciones

---

- El sistema de giro debe tener un movimiento suave con la menor fricción posible para no comprometer el equilibrio del sistema ni la carga adquirida, para esto es recomendable utilizar los cojinetes lineales ya que producen un movimiento muy efectivo.
- En el proceso de diseño de las piezas tomar en cuenta la tolerancia de la impresora con la que se van a fabricar ya que así se evitarán problemas de ensamble en donde las piezas no encajen de la manera correcta, esto evitará desperdiciar material y tiempo.
- El desplazamiento horizontal hecho por los rieles para acercar la garra a las estanterías debe de ser lo suficientemente lento para que el proceso de sujeción se dé efectivamente.
- Aunque el desempeño de la cremallera y el piñón son buenos al fabricarse con PLA y un tiempo de impresión lento, se recomienda utilizar otro método de fabricación en lugar de impresión 3D y microfilamento, una buena opción sería utilizar aluminio y procesos de fabricación con cepilladora de codo industrial y fresadora.
- No se recomienda fabricar la cremallera y el piñón en material de resina ya que aunque la precisión es mejor que en PLA, este materiales menos resistente al corte por lo que esto eventualmente causará rupturas en los dientes de las piezas.
- Para los ejes del mecanismo de sujeción tales como las dos varillas del movimiento horizontal y la varilla para el giro 180° utilizar un lubricante para mantener el movimiento suave ya que con el tiempo este puede empezar a desgastarse y generar fricción no deseada.
- Para unir el piñón al servomotor se recomienda utilizar Poxipol para pegar bien ambas piezas y que sin importar los esfuerzos no se separe una de la otra y porque es la que se utilizó en este prototipo final y funcionó muy bien.
- En la recolección de pallets al momento de sujetar uno con una carga pesada las pinzas pueden deslizarse un poco con el material del pallet (MDF) debido a la pequeña inclinación que se provocaba al momento de sujetar la carga máxima, por lo que se recomienda fabricar las pinzas en un material más resistente a la flexión.

- El objetivo del prototipo es hacerlo lo más parecido a la realidad por lo que se recomienda crear rutinas en el algoritmo de la garra para que cuando ocurra una emergencia, desconexión por energía eléctrica o se pare la maquinaria por mantenimiento, esta al momento de volver a conectarse no realice movimientos que puedan causar accidentes independientemente de la posición del sistema.
- Para que la sujeción de los pallets sea mucho más precisa se recomienda que en vez de setear posiciones mediante los motores para movimientos horizontales y verticales, que se utilice una cámara y sensores para que la garra ubique bien el pallet antes de sujetarlo y así evitar impresiones o errores.

- 
- [1] S. Logimerk, “*sistemas de almacenamiento Logimerk,*” *Logimerk*, 2021.
- [2] S. Grupo Equisa Centroamerica, “*Líderes en sistemas de estanterías en centroamérica,*” *Equisa*, 2021.
- [3] C. d. J. Tapias Sotomayor y col., “*Ventajas de los sistemas de almacenamiento automatizados,*” 2019.
- [4] A. M. Juan rosales y col., “*Almacenamiento autonomo Schaefer,*” 2018.
- [5] G. R. Fuerte, “*Grupo Roca Fuerte,*” 2020.
- [6] I. N. para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), “*Prevención de lesiones y muertes de trabajadores que operan montacargas o trabajan cerca de los mismos,*” 2015.
- [7] A. de seguridad y salud ocupacional, “*Derecho de los trabajadores,*” 2021.
- [8] Online Cosmos. (28 octubre 2020). “*Montacargas,*” dirección: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/montacargas-40ff.html>.
- [9] Ar racking. (6 de septiembre de 2018). “*Tipos de pallets y características,*” dirección: <https://www.ar-racking.com/cl/actualidad/blog/calidad-y-seguridad-3/tipos-de-pallets-y-caracteristicas>.
- [10] Polyexcel. (16 de diciembre de 2019). “*Sepa como optimizar el proceso de carga y descarga de una empresa,*” dirección: <https://polyexcel.com.br/es/esp-industria/sepa-como-optimizar-el-proceso-de-carga-y-descarga-de-una-empresa>.
- [11] Arduino. (2020). “*¿Qué es arduino?*” Dirección: <https://arduino.cl/que-es-arduino/> (visitado 19-11-2021).
- [12] (). “*Ultimaker 3 Extended - Impresora 3D Ultimaker en LDLC | ¡Musericordia!*” Dirección: <https://www.ldlc.com/es-es/ficha/PB00221390.html>.
- [13] (). “*PLA: ¿Es realmente ecológico el filamento? - 3Dnatives,*” dirección: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!>.
- [14] (). “*MG996R Datasheet(PDF) - List of Unclassified Manufacturers,*” dirección: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1131873/ETC2/MG996R.html>.

- [15] Datasheetspdf. (11 de octubre de 2018). “*Servo motor Sg90*,” dirección: <https://datasheetspdf.com/pdf/791970/TowerPro/SG90/1%7D>.
- [16] L. Electrónica. (). “*Eje acerado liso de 500mm x 8mm - Guatemala*.”
- [17] —, (). “*Cojinete lineal LM8UU de 8mm - Guatemala*.”
- [18] Arduino. (22 de agosto de 2016). “*Arduino mega*,” dirección: <https://arduino.cl/arduino-mega-2560/%7D>.
- [19] V. A. M. Mombiela, *Sistema de traslación vertical para la integración en un transelevador prototipo para el acomodamiento de cargas en bodega de Grupo Roca Fuerte Guatemala*, 1.ª ed. Universidad del Valle de Guatemala, 2022, cap. Resultados, págs. 60-66.
- [20] All datasheet. (11 de octubre de 2018). “*Servo motor Mg90*,” dirección: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/%201132104/ETC2/MG90S.html%7D>.
- [21] (). “*China Famous Brand Oulu 6.7kw Servo Motor 1500 Rpm Servo Motor - China Servo Motor, Servo Drive*,” dirección: <https://chinaoulu.en.made-in-china.com/product/RZdGUwbYMHk0/China-China-Famous-Brand-Oulu-6-7kw-Servo-Motor-1500-Rpm-Servo-Motor.html>.
- [22] (). “*China New Original AC Servo Motor Driver Mbdht2510e Panasonic AC Inverter Minas A5 Family Servo Driver Negotiate Price - China New Original AC Servo Motor Driver, Servo Motor Driver Mbdht2510e*,” dirección: <https://mobilescreen.en.made-in-china.com/product/ZOrfWRIVEckh/China-New-Original-AC-Servo-Motor-Driver-Mbdht2510e-Panasonic-AC-Inverter-Minas-A5-Family-Servo-Driver-Negotiate-Price.html>.
- [23] (). “*China Yd2 Multi Poles Multi Speeds Three Phase Induction AC Electric IEC 34-1 Motor by Changing Winding Connection for Conveyors Yd2-132m-4/2 6.5/8kw 1450/2880rpm - China Speed Controller Motor, Electrical Motor*,” dirección: <https://wnmmotor.en.made-in-china.com/product/MCKnpaUGvBhQ/China-Yd2-Multi-Poles-Multi-Speeds-Three-Phase-Induction-AC-Electric-IEC-34-1-Motor-by-Changing-Winding-Connection-for-Conveyors-Yd2-132m-4-2-6-5-8kw-1450-2880rpm.html>.
- [24] (). “*De Acero De Forja De Metal Estimular Horno Piñón Grande Para Rueda De Engranaje - Buy Big Gear Large Gear Gear Wheel Big Gear Wheel Spur Gears, Carbon Steel Spur Gear Welcome Custom Sizes, High Precision Customized Metal Gear Stainless Steel Gear Spur Gear Product on Alibaba.com*,” dirección: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/Forging-1600240629144.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_image.2453593cT901kb&s=p](https://spanish.alibaba.com/p-detail/Forging-1600240629144.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.2453593cT901kb&s=p).
- [25] (). “*Módulo Grande 34crimimo6 Para Maquinaria De Construcción, Piezas De Excavadoras Y Grullas, Estante De Engranajes Largos - Buy Large Module Long Gear Rack, Large Metal Gear Rack, Large Module Gear Rack Product on Alibaba.com*,” dirección: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/Large-1600447681536.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_image.61bb45e6IdGq3H&s=p](https://spanish.alibaba.com/p-detail/Large-1600447681536.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.61bb45e6IdGq3H&s=p).
- [26] (). “*Lámina De Acero Inoxidable Resistente Al Calor, 309s, 310s, Precio Por Kg - Buy 309s Stainless Steel Sheet, 309s Steel Sheet, 309s Stainless Steel Product on Alibaba.com*,” dirección: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/Heat-1600279433823.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_image.793657f0RVIuuK&s=p](https://spanish.alibaba.com/p-detail/Heat-1600279433823.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.793657f0RVIuuK&s=p).

- [27] (). “6ES7314-6BH04-0AB0 | Siemens Simatic S7-300 - Compact CPU | PLC-City,” dirección: <https://www.plc-city.com/shop/es/siemens-simatic-s7-300-cpu-compact/6es7314-6bh04-0ab0.html>.
- [28] (). “Ac Eléctrica Ce 3 Fase De Panel De Control Al Aire Libre Plc Inversor Del Armario De Control - Buy Plc Inverter Control Cabinet,Outdoor Inverter Control Cabinet,3 Phase Inverter Control Cabinet Product on Alibaba.com,” dirección: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/AC-electrical-CE-3-phase-control-60565546729.html>.
- [29] (). “LJA10-13A21N Limit Switch with Positive Opening Mechanism,” dirección: [https://www.orderazbil.com/ccrz\\_\\_ProductDetails?sku=LJA10-13A21N](https://www.orderazbil.com/ccrz__ProductDetails?sku=LJA10-13A21N).
- [30] (). “Módulo de programación Ethernet Universal para Control remoto PLC P2P, reemplazo con cable, Wifi inalámbrico opcional/cable coupling/module outputmodule sms - AliExpress,” dirección: <https://es.aliexpress.com/item/32591998720.html>.
- [31] (). “Piezoelectric Force Sensor Static And Dynamic Force Measurement Transducer Hammer Matched Sensor - Buy Piezoelectric Sensor,Force Transducer,Hammer Matched Sensor Product on Alibaba.com,” dirección: [https://www.alibaba.com/product-detail/Transducer-Transducer-Piezoelectric-Force-Sensor-Static\\_1600271572634.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.737941f50j4uTK&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Transducer-Transducer-Piezoelectric-Force-Sensor-Static_1600271572634.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.737941f50j4uTK&s=p).
- [32] (). “Fuente de alimentación SITOP PSU100S 10A 24V - Estabilizada,” dirección: <https://www.solucionesyservicios.biz/6EP13342BA20>.
- [33] (). “Siemens Micromaster 440 7.5kW/11kW 400V 3ph AC Inverter Drive, DBr, Unfiltered - AC Inverter Drives (400V),” dirección: <https://inverterdrive.com/group/AC-Inverter-Drives-400V/Siemens-Micromaster-440-7500W-400V/>.
- [34] (). “MEP45WL MARK•EYE PRO Registration Mark Sensor | TRI-TRONICS,” dirección: <https://www.ttco.com/sensors/mep45wl.html>.
- [35] (). “Guangzhou Factory Direct Sale Industrial Code Scanner Fixed Bar Code Reader Qr Code Scanner - Buy Fixed Bar Code Reader,Qr Code Scanner,Industrial Code Scanner Product on Alibaba.com,” dirección: [https://www.alibaba.com/product-detail/Scanner-Qr-Guangzhou-Factory-Direct-Sale\\_1600329741415.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_image.78be7144P1AesX&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Scanner-Qr-Guangzhou-Factory-Direct-Sale_1600329741415.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.78be7144P1AesX&s=p).

## 12.1. Planos de construcción

Los planos se adjuntan en el siguiente enlace de Github:

<https://github.com/DHENGSTENBERG/Planos-Mecanismo-de-sujeci-n>

## 12.2. Videos

Videos del prototipo final funcionando en el siguiente enlace de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/u/4/folders/1o1BttF2W-Gosf5cQFYwkSH5dgU6-UCx3>

## 12.3. Código de Arduino

<https://github.com/DHENGSTENBERG/CodigoTesis.git>

## 12.4. Informe de análisis de tensión de garra de sujeción

<https://github.com/DHENGSTENBERG/Informe-de-an-lisis-de-tensi-n-de-garra-de-sujeci-n.git>

## 12.5. Diagramas de flujo de lógica para código arduino

<https://github.com/DHENGSTENBERG/Diagrama-de-flujo-l-gica-c-digo-arduino.git>