



Diseño y construcción de un robot paralelo comandado por cables espacial

Jhon Anderson Cardozo Varón

**Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Mecánica**

Ibagué, 2019

Diseño y construcción de un robot paralelo comandado por cables espacial

Jhon Anderson Cardozo Varón

Trabajo de grado que se presenta como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

Jorge Andrés García Vanegas

Profesor

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Mecánica

Ibagué, 2019



Mi tutor por su apoyo incondicional a lo largo de estos años de estudio. Mis padres por guiarme en el camino de la academia y mostrarme el sendero hacia la superación profesional. A mis amigos por apoyarme en cada decisión tomada acertada o no, y por brindarme la motivación necesaria para afrontarlas.



Agradecimientos

En primera estancia, me gustaría dar las gracias a mi director Jorge Andrés García Vanegas, por brindarme la oportunidad de pertenecer en el semillero de investigación MEC-AUTRONIC y participar en el proyecto de investigación de robótica con cables, en el área de Ingeniería Mecatrónica, el cual me ha permitido adquirir nuevos conocimientos que componen la Mecatrónica. Gracias por su disponibilidad y trato cercano. Gracias también a mi familia por todo el esfuerzo que han puesto por darme lo necesario, es valorado por mi persona de la manera más agradecida. Realmente, les ofrezco mi satisfacción por darme tanto sin recibir nada a cambio, apoyándome tanto en lo económico, como en lo personal. También agradecer al programa de ingeniería mecánica de la universidad de Ibagué por su aporte al conocimiento y formación competitiva a ser cada vez mejor. Finalizando quiero agradecer a mis compañeros del semillero MEC-AUTRONIC con los que compartí esta aventura dentro del laboratorio, como afuera, apoyándonos en cada momento y circunstancia a culminar la carrera y crecer como investigadores.

Resumen

En este trabajo se describe la asistencia de investigación desarrollada para el diseño y la construcción de un Robot Paralelo Comandado por Cables (RPCC) de tipo espacial, desarrollado en el semillero de diseño mecatrónico, MEC-AUTRONIC, perteneciente al grupo de investigación D+TEC de la Universidad de Ibagué. Dicho robot de 3 GDL consta de una plataforma móvil, más conocida como efector final, suspendida y unida por 8 cables a una plataforma fija (bastidor). En la primera etapa del proyecto, se desarrolló un modelo matemático de la cinemática del robot para poder controlarlo y obtener así su espacio de trabajo. En este trabajo se desarrolla el diseño y la construcción de un Robot Paralelo Comandado por Cables (RPCC) suspendido y de 3 GDL (Grados-de-Libertad), ya que el número de cables es mayor al número de grados de libertad. La redundancia permite que el robot sea tolerante a fallas, las tensiones en los cables disminuyan, se amplíe el espacio de trabajo y mejor la rigidez de mismo. El espacio de trabajo de un RPCC es el espacio por donde se puede desplazar la estructura móvil sin que haya colisiones entre los cables y cuerdas que solamente tiren del efector final, ya que éstas no pueden empujar. Los RPCC tiene algunas ventajas interesantes, como la reducción de la inercia de la estructura móvil, altas aceleraciones y movimientos rápidos, un amplio espacio de trabajo, esto dependerá de los límites de tensión y la longitud en los cables. Igual que sus ventajas también presentan varios inconvenientes, que día a día son estudiados para mejorar la eficiencia y factibilidad de estos robots como es: la colisión de los cables con el ambiente, naturaleza no rígida de los cables para posicionar y rotación en el efector final.

Palabras clave: Robótica paralela, Robots paralelos comandados por cables, Robots con cables, Solidworks.

Abstract

This paper describes the research assistance developed for the design and construction of a space-based Parallel Robot Commanded by Cables (RPCC), developed in the mechatronic design hotbed, MEC-AUTRONIC, belonging to the D + TEC research group from the University of Ibagué. Said robot of 3 GDL consists of a mobile platform, better known as end effector, suspended and joined by 8 cables to a fixed platform (frame). In this work the design and construction of a Parallel Robot Commanded by Cables (RPCC) suspended and of 3 GDL (Degrees-of-Freedom) is developed, since the number of cables is greater than the number of degrees of freedom. The redundancy allows the robot to be tolerant to faults, the tensions in the cables decrease, the work space was expanded and the rigidity of it improved. The work space of an RPCC is the space through which the mobile structure can be moved without collisions between the cables and ropes that only pull on the end effector, since they can not push. The RPCC has some interesting advantages, such as the reduction of the inertia of the mobile structure, high accelerations and fast movements, a wide working space, this will depend on the voltage limits and the length in the cables. The same as its advantages also present several disadvantages, which day by day are studied to improve the efficiency and feasibility of these robots such as: the collision of the cables with the environment, non-rigid nature of the cables to position and rotation in the end effector.

Keywords: Parallel Robotics, Cable-driven Parallel Robots, Cable robots, Solidworks.

Contenido

Resumen	VI
Lista de símbolos y abreviaturas	XV
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y motivación	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura del documento	3
2. Robots paralelos comandados por cables	5
2.1. Preliminares	6
2.2. Clasificación de robots con cables	8
2.2.1. RPCC según su espacio de trabajo	8
2.2.1.1. Planares	8
2.2.1.2. Espaciales	8
2.2.2. RPCC según su numero de cables y conexión con el bastidor	9
2.2.2.1. Completamente restringido	9
2.2.2.2. Posicionamiento restringido redundante	9
2.2.3. RPCC según su interacción con la gravedad	9
2.2.3.1. Suspendidos	9
2.2.3.2. Comandados	10
2.3. Aplicaciones de robots con cables	10
2.3.1. Robots con cables planares	10
2.3.1.1. Prototipo ERM	10
2.3.1.2. V Plotter	11
2.3.1.3. Maslow	11
2.3.2. Robots con cables espaciales	12
2.3.2.1. Skycam	12
2.3.2.2. Ipanema	13
2.3.2.3. Cogiro	14
2.4. Otras aplicaciones generales	14
3. Modelamiento cinemático y espacio de trabajo	17
3.1. Preliminares	18
3.2. Cinemática Inversa	20
3.3. Cinemática Directa	21
3.4. Espacio de Trabajo	22
3.5. Generación de trayectorias	24

3.5.1.	Trayectoria Cuadrado RPCC espacial	25
3.5.2.	Trayectoria Circulo RPCC espacial	26
3.5.3.	Trayectoria Rombo RPCC espacial	27
3.5.4.	Trayectoria Linea RPCC espacial	28
4.	RPCC-LAB: Prototipo para laboratorio	29
4.1.	Parámetros de diseño	30
4.2.	Selección de materiales	30
4.2.1.	Tablero de Fibra de Densidad Media (MDF)	30
4.2.2.	Poliácido Láctico (PLA)	31
4.2.3.	Nylon	31
4.2.4.	Aluminio	32
4.3.	Componentes del robot	33
4.3.1.	Estructura del robot	33
4.3.1.1.	Perfiles de la estructura	33
4.3.1.2.	Uniones entre los perfiles	34
4.3.2.	Sistema Recolector	36
4.3.2.1.	Cable	38
4.3.2.2.	Conjunto carrete y eje roscado	40
4.3.2.3.	Caja reductora	41
4.3.2.4.	Mecanismo de transferencia de movimiento del bombo	43
4.3.2.5.	Plataforma del sistema recolector	44
4.3.3.	Sistema de poleas	45
4.3.3.1.	Poleas	45
4.3.3.2.	Cuerpo del mecanismo	46
4.3.3.3.	Sujeción al chasis	47
4.3.4.	Efector-Final	50
4.3.4.1.	Sistema de poleas	51
4.3.4.2.	estructura mecánica del efector final	52
4.4.	Simulaciones del prototipo	52
4.4.1.	Simulación de la estructura	53
4.4.2.	Simulación Sistema Recolector	54
4.4.3.	Simulación sistema de poleas	56
4.5.	Tablas de componentes del prototipo	59
5.	Resultados experimentales	61
5.1.	Pruebas y resultados experimentales con el modelo matemático	62
5.2.	Pruebas experimentales de fuerza a la tensión y deformación	66
6.	Conclusiones y trabajos futuros	69
6.1.	Conclusiones	70
6.2.	Trabajos futuros	70
	Referencias	73



Índice de tablas

4.1. Propiedades mecánicas del MDF	30
4.2. Propiedades mecánicas del PLA	31
4.3. Propiedades mecánicas del Nylon	32
4.4. Propiedades mecánicas del Aluminio	32
4.5. Tabla-resumen de componentes	59
4.6. Tabla resumen de componentes del efector final	60
6.1. Tabla de piezas en sus respectivos planos	81
6.2. Tabla de presupuesto total del RPCC del semillero MECAUTRONIC de la Universidad de Ibagué	100

Índice de figuras

1.1. Prototipo a escala de un RPCC espacial realizado por UCLM	2
2.1. Diagrama esquemático de un RPCC	6
2.2. Mecanismo para recoger/soltar cable de robots paralelos convencionales	7
2.3. Robot con cables planar	8
2.4. Robot con cables espacial	8
2.5. RPCC Completamente restringido y Posicionamiento restringido redundante	9
2.6. Prototipo RPCC planar y espacial ERM con su sistema de recolección	11
2.7. RPCC planar V Plotter	11
2.8. RPCC planar Maslow	12
2.9. RPCC espacial SkyCam	13
2.10. RPCC espacial IPAnema	13
2.11. RPCC espacial CoGiro	14
2.12. Implementación de robots con cables en la industria del transporte.	15
2.13. Implementación de robots con cables en la industria energética.	15
2.14. Implementación de robots con cables en el sector de la construcción y logística.	16
2.15. Implementación de robots con cables en la Ingeniería Civil.	16
3.1. Elementos preliminares a la cinemática en RPCC	18
3.2. Esquema de transformaciones cinemáticas	19
3.3. Esquema, nomenclatura y consideraciones previas del RPCC	19
3.4. Relación ángulo-arco en el carrete del modulo de recolección	21
3.5. Espacio de trabajo RPCC planar	23
3.6. Espacio de trabajo RPCC espacial	23
3.7. Trayectoria cuadrada espacial 200x200mm plano $Y - Z$	25
3.8. Perfil de posición de los motores trayectoria cuadrada 200x200mm	25
3.9. Trayectoria circular espacial radio 75mm plano $Y - Z$	26
3.10. Perfil de posición de los motores trayectoria circular espacial radio 75mm	26
3.11. Trayectoria de rombo espacial de 150x150mm plano $Y - Z$	27
3.12. Perfil de posición de los motores trayectoria de rombo espacial 150x150mm	27
3.13. Trayectoria Lineal espacial de 100mm en el plano $Y - Z$	28
3.14. Perfil de posición de los motores trayectoria lineal espacial de 100mm	28
4.1. Uniones fabricadas por impresión 3D.	34
4.2. Uniones fabricada por corte a láser en MDF	35
4.3. Marco del robot y uniones entre los perfiles	35
4.4. Sistema recolector	36
4.5. Motor Nema 23	37

4.6. Cable para pescar trenzado marca spiderwire	38
4.7. Carrete y eje roscado	40
4.8. Croquis simplificado del carrete	41
4.9. componentes del bombo y su relleno	41
4.10. Caja reductora NVMR30 $i=10$	42
4.11. Corona Sin-Fin $i=5$ en Nylon	42
4.12. Caja reductora $i=5$	43
4.13. Croquis simplificado de un mecanismo biela-manivela	43
4.14. Mecanismo de transferencia de movimiento del bombo	44
4.15. Plataforma del mecanismo de recolección	45
4.16. Poleas del robot	46
4.17. Soporte poleas giratorias	46
4.18. Sistema de poleas	47
4.19. Ensamblaje completo del RPCC espacial	48
4.20. Esquema del sistema de poleas del efector final y prototipo	49
4.21. Esquema del sistema de poleas vista superior	49
4.22. Efector Final en programa CAD	50
4.23. Efector Final Construido	51
4.24. Soporte sistema de poleas efector final	51
4.25. Clavija de guitarra	52
4.26. Chasis del efector final	52
4.27. Simulación de la estructura del prototipo en las columnas	53
4.28. Simulación de la estructura del prototipo en las filas y columnas	54
4.29. Simulación Soporte SK8 del sistema recolector	54
4.30. Simulación del bombo	55
4.31. Simulación en las poleas	56
4.32. Simulación del sistema de poleas con peso máximo	57
4.33. Simulación sistema de poleas peso experimental = 5Kg	58
5.1. Prototipo construido	62
5.2. Prototipo construido	63
5.3. Prototipo construido	64
5.4. Prototipo construido	64
5.5. Prototipo construido	65
5.6. Prototipo construido	65
5.7. Ensayo de tracción en la cuerda	66
5.8. Diagrama esfuerzo-deformación en el cable	67
5.9. Ensayo de tracción en las poleas	67
5.10. Diagrama esfuerzo-deformación en el cable	68
6.1. Pie de amigo del prototipo	75
6.2. Sistema recolector	75
6.3. Sistema de poleas puesta en marcha	76
6.4. Efector final vista superior	76
6.5. Prototipo vista superior	77
6.6. Prototipo construido	77
6.7. Sistema de poleas vista isométrica	78
6.8. Efector final vista frontal	78



6.9. Efecto final vista isométrica	79
6.10. Sistema de poleas	79
6.11. Efecto final vista dimétrica	80



Lista de símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>MDF</i>	Tablero de fibra de densidad media
<i>PLA</i>	Acido poliactico
<i>ABS</i>	Acrilonitrilo butadieno estireno
<i>CAD</i>	Diseño asistido por computadora
<i>CAE</i>	Ingeniería asistida por computadora

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo expone la motivación y antecedentes del presente artículo de investigación, los objetivos y estructura del documento.

1.1. Antecedentes y motivación

Actualmente, se requiere de la computación para aprovechar las tecnologías actuales en cualquier ámbito posible.

Uno de los ámbitos o de las ramas de la tecnología más interesantes es la robótica, que ha ido escalando progresivamente. La prueba definitiva se puede ver en cualquier empresa como: Amazon, google, ABB, entre otras, que gracias a la robótica han obtenido mejoras en cuanto a precisión, tiempos y costos. Dentro de la robótica, se encuentran los robots o manipuladores industriales que permiten solucionar varios tipos de problemas que se encuentran en cualquier empresa o investigación en el día a día [11].

En el campo de la robótica se distinguen dos arquitecturas principales en lo concerniente al diseño de mecanismos que componen los robots. La primera de ellas, y más común, es la arquitectura serial, donde desde el punto de vista cinemático sólo existe un único camino entre dos puntos cualesquiera del mecanismo; la segunda corresponde a la arquitectura paralela, en donde se pueden presentar múltiples caminos (por diferentes cadenas cinemáticas) que unen dos puntos del mecanismo.

Figura 1.1: Prototipo a escala de un RPCC espacial realizado por UCLM



Fuente: Semillero de diseño mecatrónico, MEC-AUTRONIC

El enfoque serial es el más difundido y es el que se ha aplicado en la gran mayoría de los manipuladores industriales; sin embargo, desde principios de los 80s la arquitectura paralela ha tenido grandes avances y se vislumbra como una alternativa sólida a los robots seriales. Estos robots se han dividido en dos tipos: Robótica paralela Comandada por Cables (RPCC) y Robótica paralela Comandada por Eslabones Rígidos (RPCER), en donde los RPCC ofrecen ventajas significativas como son: mayor capacidad de carga o mayor relación carga útil vs peso propio del robot; mayor rigidez estructural; y

mayor precisión en el desplazamiento del efector final como consecuencia de su mayor rigidez mecánica, en comparación de los RPCER. Estas propiedades los convierten en una alternativa bastante atractiva para las múltiples aplicaciones requeridas en la industria moderna.

En Europa se han desarrollado una serie de avances en temáticas relacionadas con el diseño de RPCC, entre los cuales vale la pena destacar el “Diseño de un robot 3D comandado por cables a partir de un modelo cartesiano” çitarrealizado en la Universidad Castilla de la Mancha (UCLM) en España, construido en el seminario de robótica de la Universidad de Ibagué para posteriores investigaciones, ver la Fig. 1.1. Dicho trabajo se enfoca en gran medida a proponer un diseño general propio para la Universidad de Ibagué de un RPCC con ciertas modificaciones de interés, tales como la tensión de los cables, mejora del sistema de poleas y efector final.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Diseñar y construir un Robot Paralelo Comandado por Cables (RPCC) espacial para futuros estudios e investigaciones en el laboratorio de diseño mecatrónico del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Ibagué.

Objetivos específicos

- **Estudiar las configuraciones de los robots comandados por cables.** Se estudiarán trabajos previos de investigación para identificar las principales configuraciones de los robots con cables y así poder conocer las estructuras, los mecanismos y componentes electrónicos que los conforman.
- **Diseñar un prototipo experimental.** Definir las características de diseño idóneas para la construcción de un robot con cables espacial de dimensiones reducidas para uso en el laboratorio de diseño mecatrónico de la Universidad de Ibagué. El diseño 3D del robot se realizará utilizando Solidworks como herramienta CAD (Diseño Asistido por Computador), junto con la generación de los planos de fabricación y la selección de los materiales tanto mecánicos como electrónicos.
- **Construir un prototipo experimental.** Se construirá un prototipo utilizando perfiles de aluminio y piezas estructurales que se fabricarán con plástico mediante impresión 3D. El sistema de movimiento será controlado por una placa de desarrollo electrónico comercial.
- **Verificar el funcionamiento del robot.** Una vez cumplidos los objetivos anteriores, se realizarán pruebas experimentales, para comprobar el movimiento del Efector Final en su espacio de trabajo. Estas pruebas se realizarán en conjunto con el estudiante Julián Ernesto Taborda Almanza, quien estará encargado del modelamiento matemático y control del robot.

1.3. Estructura del documento

El presente documento se ha organizado de la siguiente manera:

El *capítulo 1* expone la motivación y antecedentes del presente artículo de investigación, los objetivos y estructura del documento.

El *capítulo 2* resume el estado del arte de los robots con cables y los tipos que existen entre ellos. A su vez se detalla el robot de de la Universidad de Castilla la Mancha (UCLM), que fue el prototipo guía de investigación en el semillero MEC-AUTRONIC.

En el *capítulo 3* se implementa el modelo cinemático del prototipo para las simulaciones y pruebas experimentales. Además, se muestra el espacio de trabajo del robot.

En el *capítulo 4* se realizara la descripción y el análisis de los elementos mecánicos que componen el robot.

En el *capítulo 5* se realizan pruebas y resultados experimentales se concluye los márgenes de error, mejores y modificaciones que se harán en futuras investigaciones del robot.

En el *capítulo 6* presentan las conclusiones alcanzadas en el proyecto de investigación, y se enumeran algunos trabajos futuros para la continuación del trabajo realizado en el semillero MEC-AUTRONIC.

Capítulo 2

Robots paralelos comandados por cables

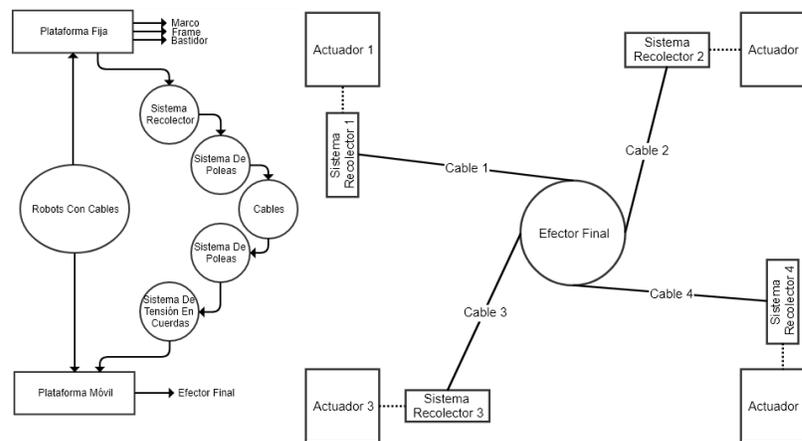
Este capítulo resume el estado del arte de los robots con cables y los tipos que existen entre ellos. A su vez se detalla el robot de de la Universidad de Castilla la mancha (UCLM), que fue el prototipo guía de investigación en el semillero MEC-AUTRONIC.

2.1. Preliminares

La robótica cumple un papel muy importante en la industria sobre todo en áreas de modernización e innovación. En algunos casos se ha optado por los robots paralelos debido a que enfoca mejor la energía de los actuadores para aumentar la capacidad de carga de su efector y elevar la velocidad de movimiento del mismo, este tipo de robots tienen una mayor precisión de posicionamiento y orientación comparado con los robots tipo serie [1].

Un Robot Paralelo Comandado por Cables (RPCC) consta principalmente de una base fija y una móvil unidas mediante varios cables cinemáticos, cada cable está gobernado por un actuador, en la mayoría de los casos se busca que los actuadores estén fijos a la base para mejorar la dinámica del robot. En la Fig. 2.1 se muestra un tipo de RPCC [5].

Figura 2.1: Diagrama esquemático de un RPCC



Fuente: Autor

Las ventajas de los RPCC sobre las uniones rígidas son [3]:

- Estos mecanismos tienen un espacio de trabajo relativamente grande en comparación con su tamaño.
- Son más ligeros y más fáciles de transportar.
- Tienen pocas partes móviles, que dan buenas propiedades inerciales.
- Tienen alta relación de carga útil de peso.
- Tienen mejor transportabilidad.
- Su fabricación es relativamente económica.

La sustitución de uniones rígidas por cables abre las puertas a muchas aplicaciones potenciales con grandes espacios de trabajo, la manipulación de alta velocidad, la manipulación de materiales pesados, la limpieza de zonas catastróficas, de acceso a lugares remotos y la interacción con los peligros de la naturaleza.

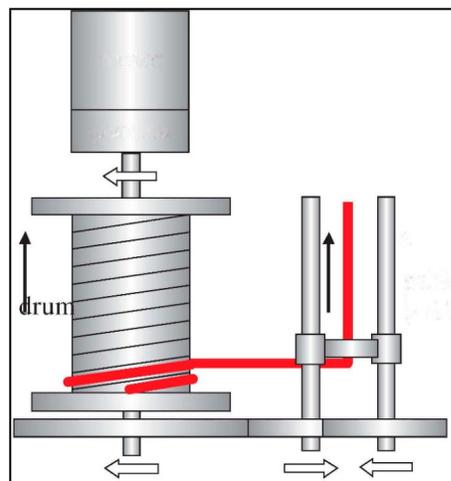
Sin embargo, introduce muchos nuevos retos en el estudio de RPCC, distintos a los retos de los robots convencionales. A diferencia de las uniones rígidas, los cables sólo pueden aplicar fuerzas

de tracción y, por tanto, se deberán mantener en tensión a lo largo del espacio de trabajo del robot y tan pronto como los cables tomen holgura, la estructura del robot por cables colapsará. Debido a estas limitaciones físicas antes mencionadas, las teorías de control conocidas no pueden utilizarse directamente para los RPCC y deben ser modificadas para proporcionar tensión positiva para los cables. Aquí la dinámica del sistema juega un papel muy importante.

Hay 3 partes destacadas para la investigación de los RPCC, son:

- **Chasis o bastidor:** Esta parte es muy importante por el hecho de que tiene que soportar estructuralmente todas las demás partes. Cada manipulador tiene un bastidor distinto dependiendo de la aplicación que tenga que ejercer. A este chasis van anclados todos los demás sistemas, siendo crucial unos buenos soportes que liberen de vibraciones innecesarias a los mecanismos o actuadores, esto en parte se consigue con el material que se utilice las uniones que tenga el bastidor.
- **Actuador o mecanismo para liberar/recoger cable:** Como se muestra en la Fig. 2.2, a estos actuadores van unidos los cables y son importantes para darle un posicionamiento al efector final ya que dependiendo de cuanto libere o recoja un actuador variará la posición del efector final. Este mecanismo ha ido mejorando en los sucesivos diseños, como es el caso del posicionamiento del cable en el actuador para evitar movimientos bruscos de este cable, ranurado de la bobina, etc [10].

Figura 2.2: Mecanismo para recoger/soltar cable de robots paralelos convencionales



Fuente:MEC-AUTRONIC

- **Efector final:** Es una parte muy importante, ya que se debe diseñar de manera que su geometría permita una correcta conexión con el bastidor.

Estas partes son las que día a día son estudiadas para mejorar la precisión y estabilidad que son los problemas más frecuentes en la Robótica con cables.

2.2. Clasificación de robots con cables

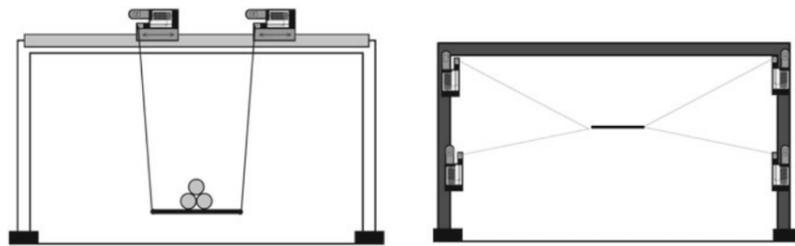
2.2.1. RPCC según su espacio de trabajo

Este tipo de RPCC se pueden manejar en dos dimensiones y tridimensional en el que se dividen en los siguientes tipos:

2.2.1.1. Planares

Aquellos cuyo movimiento está restringido a un plano, pueden tener dos o tres grados de libertad; traslación sobre el plano y una rotación alrededor del eje perpendicular al mismo, un ejemplo se muestra en la Fig. 2.3

Figura 2.3: Robot con cables planar

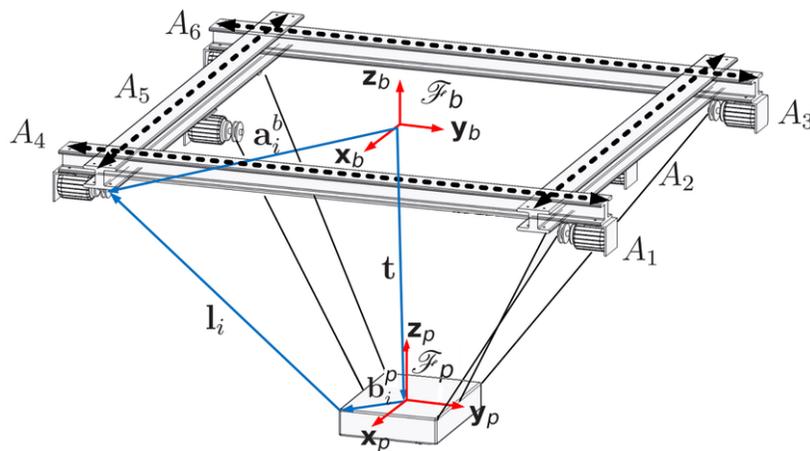


Fuente:[10]

2.2.1.2. Espaciales

Son aquellos mecanismos paralelos que pueden trasladarse y orientarse en el espacio y puede alcanzar 3,4,5,6 y 8 GDL. Sus articulaciones pueden ser universales o esféricas. La Fig. 2.4 expone un manipulador paralelo tipo espacial.

Figura 2.4: Robot con cables espacial



Fuente:[10]

2.2.2. RPCC según su numero de cables y conexión con el bastidor

Un criterio obvio para la clasificación es considerar la cantidad de cables denotados por m y los grados de libertad controlables de la plataforma móvil indicados por n . Por lo que se llevan a las siguientes clases:

2.2.2.1. Completamente restringido

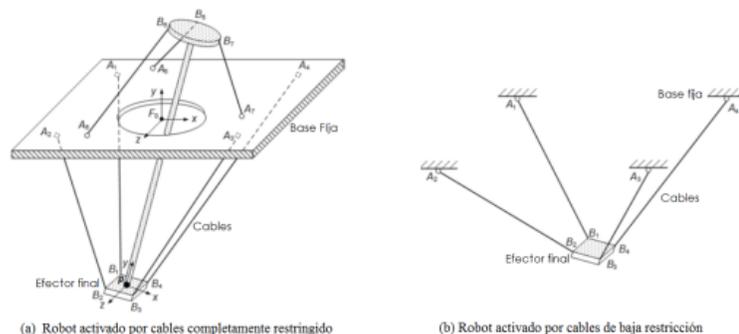
La posición y orientación del efector final está directamente relacionada con el número de cables usados para su control. En este tipo de RPCC, se puede lograr determinadas posiciones y orientaciones del efector siempre y cuando se cumpla la condición de que el número de cables tiene que ser igual a $n+1$, siendo n lo GDL, que se debe garantizar en la plataforma, tal y como se observa en la Fig. 2.5a expone un manipulador paralelo tipo espacial.

2.2.2.2. Posicionamiento restringido redundante

Estos robots es predominantemente operado en configuraciones suspendidas y no son cinemáticamente redundantes, ya que solo tienen una solución para la cinemática inversa. problema. La redundancia se relaciona con el número de restricciones cinemáticas y por lo tanto también a su actuación, ya que hay más restricciones cinemáticas que los grados de libertad. Por lo tanto, las fuerzas estáticas del robot son generalmente indefinidas.

Lo que indica que el robot se basa en la gravedad para estar equilibrado. El atributo suspendido proporciona una forma práctica de describir que el área de trabajo del robot se encuentra principalmente debajo del bastidor del robot y el robot se opera de forma similar a una grúa. vea la Fig. 2.5b

Figura 2.5: RPCC Completamente restringido y Posicionamiento restringido redundante



Fuente:[10]

2.2.3. RPCC según su interacción con la gravedad

2.2.3.1. Suspendidos

Un robot con cables se entiende como suspendido cuando las tensiones de todos los cables que sobre el efector final actúan son positivas por acción de la gravedad y la masa del mismo, lo que quiere decir que la dirección de las tensiones se oponen a la al sentido de la fuerza de gravedad. Debido a esto se entiende que al momento del efector final tener un desplazamiento a favor de esta dirección no tendrá una aceleración mayor a 1G. Un ejemplo de ello es el robot mostrado en Fig. 2.5a.

2.2.3.2. Comandados

Un robot con cables se identifica porque el movimiento en cualquiera de los tres ejes del efector final estará propiciado por un agente externo, en este caso, actuadores. Esto quiere decir que a diferencia de los suspendidos, que tienen una aceleración en sentido de la fuerza de la gravedad igual a 1G, estos robots comandados pueden reducir esta aceleración y también superarla sin inconvenientes. Un ejemplo de ello es el robot mostrado en Fig. 2.5b.

2.3. Aplicaciones de robots con cables

El conocimiento de los robots paralelos se remonta a 1931 con el diseño realizado por James E. Gwinnett, evolucionando en el tiempo: pasando por el robot industrial paralelo construido por Willard Pollard, la plataforma paralela inventada por el Dr. Eric Gough en 1940, el simulador de vuelos de Stewart en 1965, el simulador de movimiento basado en un hexápodo de Cappel en 1967, en 1978 Hunt destacó la importancia de un estudio más detallado de las ventajas en cuando a rigidez y precisión de los robots paralelos, McCallion y Pham en 1979 propusieron usar la plataforma Stewart como un manipulador paralelo debido a que su efector final es mucho menos sensible a errores, y en 1990 cuando Reymond Clavel modifica al manipulador Stewart y surge el manipulador Delta de tres y cuatro grados de libertad. Desde entonces, este tipo de robot ha adquirido un interés destacado entre los estudiosos de la robótica y en la industria. En general, las aplicaciones de estos tipos de robots son las siguientes [4]:

- **Pick and Place.** Puede tomar diferentes objetos y depositarlos con precisión en otro lugar del espacio de trabajo, mediante el uso de una pinza o un dispositivo similar como efector final.
- **Impresión 3D.** Es una forma de fabricación de piezas en planos espaciales, para aplicaciones especiales.
- **Medición.** Con el uso de sensores en la parte del efector final, dan lugar a un sistema de medición.

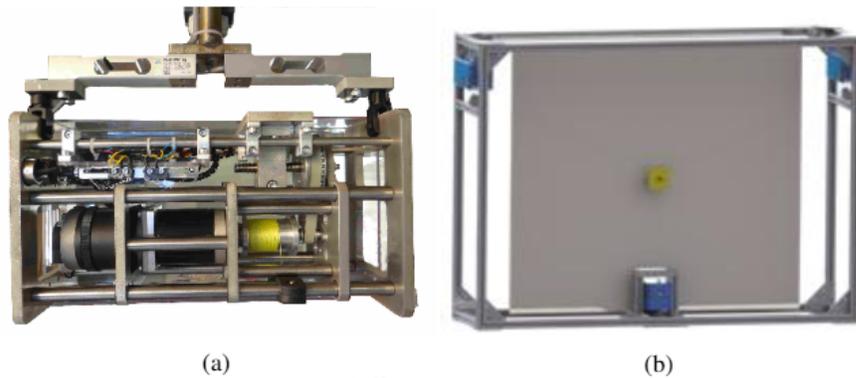
Estas aplicaciones han dado paso a los siguientes RPCC. Gracias a ellas han hecho un gran aporte en el campo de I+D+i (Innovación, desarrollo e investigación). Ejemplos de ellas las verán a continuación:

2.3.1. Robots con cables planares

2.3.1.1. Prototipo ERM

Prototipo desarrollado para asistencia de elevación de cargas en el plano 3D Fig. 2.6a y en el espacio 2D Fig. 2.6b, desarrollando unas soluciones mecánicas para el enrollamiento cruzado de los cables implementados y la innovación en cuanto a el uso de imagen y vídeo para el posicionamiento de cargas. Utilizan en su diseño perfiles de aluminio modular y impresión 3D.

Figura 2.6: Prototipo RPCC planar y espacial ERM con su sistema de recolección

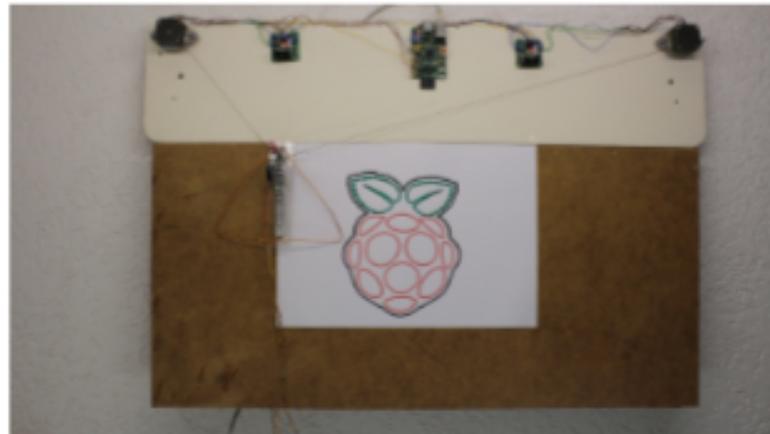


Fuente:[2]

2.3.1.2. V Plotter

El plotter V que se muestra aquí utiliza una Raspberry Pi, dos puentes dobles en H para impulsar los actuadores, dos motores paso a paso para variar la longitud del cable y, finalmente, un servo para levantar o bajar el lápiz. Todo el mecanismo está montado en una placa con las dimensiones 94x20cm. La placa para el área de dibujo de abajo es 90x43cm. El área cubierta por la pluma es de aproximadamente 56x30cm . El prototipo tal y como se describe se muestra en Fig. 2.7.

Figura 2.7: RPCC planar V Plotter



Fuente:[10]

2.3.1.3. Maslow

Maslow es un proyecto de código abierto impulsado por la comunidad con el objetivo de hacer que la tecnología CNC de gran formato esté disponible para todos. Maslow es una máquina de corte CNC grande (4'x8 ') diseñada para permitirle cortar cosas grandes y útiles de madera y otros materiales planos. Recorte una casa pequeña, un kayak, una casa en el árbol, algunos muebles o cualquier otra

cosa que pueda imaginar Fig. 2.8. Maslow está diseñado para ser asequible para comprar, barato para enviar, fácil de usar y potente

Figura 2.8: RPCC planar Maslow



Fuente:[7]

2.3.2. Robots con cables espaciales

2.3.2.1. Skycam

Una de las ventajas de los RPCC, es la gran área de trabajo que pueden abarcar, por lo tanto, estos mecanismos se utilizan en varias aplicaciones, principalmente en los casos en que se requiere un gran espacio de trabajo.

La aplicación más conocida es la SkyCam, una cámara que se usa para televisar partidos de eventos deportivos instalada sobre el propio estadio.

El sistema SkyCam es un sistema de transmisión de imágenes mediante una cámara robótica suspendida por cuatro cables e impulsada con un equipo computarizado. Su peculiar diseño hace que el sistema de cámara SkyCam sea el único en el mundo con una cámara estabilizada que puede volar a cualquier lugar del espacio tridimensional en medio de un evento deportivo como es el fútbol, fútbol americano, béisbol, tenis, entre otro. Como vemos en la Fig. 2.9, lo que destaca del SkyCam es su facilidad de ser transportado y la sencillez de su estructura mecánica, por su característica Modular, donde fijan el sistema recolector en las vigas de los estadios deportivos, por medio de un soporte armable. Aquella base está fabricada en Acero liviano, para facilitar su traslado.

Figura 2.9: RPCC espacial SkyCam



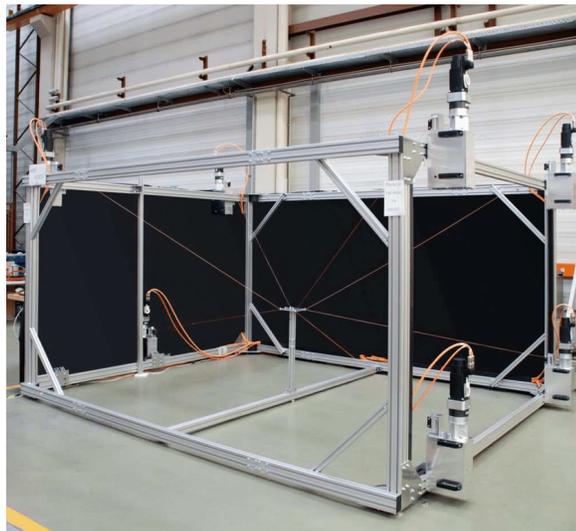
Fuente:[9]

2.3.2.2. Ipanema

La sociedad Fraunhofer, una organización de investigación alemana, ha desarrollado el robot IPAnema también basado en el control por cables que mueven un efector en todo el espacio de la estructura, donde gracias a la cinemática del robot permite un movimiento libre y totalmente controlable.

Esta aplicación tubo como iniciativa, que el robot tuviera 8 grados de libertad (GDL). Los GDL nos referimos al Control de 8 motores paso a paso (PaP) o DC (Corriente directa), para manipular un mecanismo en conjunto. Esta idea, como se observa se hizo con el fin de mejorar la precisión, exactitud y control, para sistemas de medición mediante un plano tridimensional. Su estructura está fabricada en perfiles modulares de acero y sistema recolector en placas de aluminio, dándole facilidad al transportar por su ensamble y piezas livianas. véase la Fig. 2.10

Figura 2.10: RPCC espacial IPAnema



Fuente:[10]

2.3.2.3. Cogiro

Como se observa en la Fig. 2.11, TecNALIA y CNRS-LIRMM han desarrollado el prototipo CoGiRo, un robot paralelo de grandes dimensiones y 6 grados de libertad accionado por 8 cables servo-controlados. A diferencia de otros robots de cables con mayor número de cables que de grados de libertad, su configuración es tipo grúa; es decir, todos los puntos de salida de los cables están localizados sobre el volumen de trabajo y la gravedad se utiliza para mantener los cables tensionados. La configuración de los cables se ha optimizado para conseguir un amplio ratio volumen de trabajo vs espacio ocupado por el prototipo (ratio del 83 %). Las dimensiones de la estructura de CoGiRo son 15,24 m x 11,24 m x 5,93 m (longitud x anchura x altura). La estructura es reticular de aluminio; los 8 servo cabestrantes están fijos al suelo y los cables están guiados mediante poleas a la parte superior de la estructura. La máxima longitud de cable es de 30 m. Los actuadores son servo-controlados, trifásicos, de la casa B&R. El controlador donde están implementados los algoritmos de control es industrial y es de B&R. La carga máxima que se puede manipular son 500 kg. La repetitividad en el posicionamiento de la plataforma móvil es inferior a 1mm.

Figura 2.11: RPCC espacial CoGiro



Fuente:[8]

2.4. Otras aplicaciones generales

Las aplicaciones que en la actualidad le son dadas a los robots con cables en la industria van en aumento y afianzándose en sus implementaciones, esto debido a las ventajas significativas que estos presentan respecto a otro tipo de robots y que anteriormente se mencionaban. A continuación se presentan los campos ingenieriles donde se ha optado por la implementación de este tipo de robots y en los cuales los resultados de trabajo muestran la adaptabilidad y confianza en cuanto al cumplimiento de las actividades por las cuales fueron construidos.

- Construcción de aviones, trenes y barcos. El transporte de piezas para la elaboración de estos mismos requieren plataformas que cuenten con una precisión milimétrica para garantizar su integridad y su correcto posicionamiento en su instalación, pero que además tengan la potencia necesaria para operar con cargas tan elevadas. Es por esto que la implementación de los robots con cables se hace necesaria, tal y como se muestra en la Fig. 2.12

Figura 2.12: Implementación de robots con cables en la industria del transporte.



Fuente:[?]

- Sector energético. La instalación de plantas de energía solar, eólica, nuclear e hidráulica requiere el manejo de grandes piezas (dimensiones y masas), pero también, después de su instalación requieren de mantenimiento en sus grandes estructuras, es por esto que la implementación de los robots con cables se hace necesaria para la elaboración de cada una de estas actividades, tal y como se muestra en la Fig. 2.13.

Figura 2.13: Implementación de robots con cables en la industria energética.



Fuente:[?]

- Construcción y logística. En la arquitectura actual se hace cada vez mas usual la implementación de cubiertas cerámicas y poliméricas, la mayoría con grandes dimensionamientos y con demasiada fragilidad. De igual forma, la organización que se requiere en bodegas de almacenamiento de diferentes productos requiere un manejo sumamente delicado con estos mismos, es por esto que los robots con cables se hacen indispensables para cumplir con dichas tareas, debido a que por medio de su estructura de control es posible regular cada uno de los movimientos que tendrá el efector final y que estará operando cada una de estas piezas, garantizando la integridad deseada. Sus esquemas de implementación se observan en la Fig. 2.14.

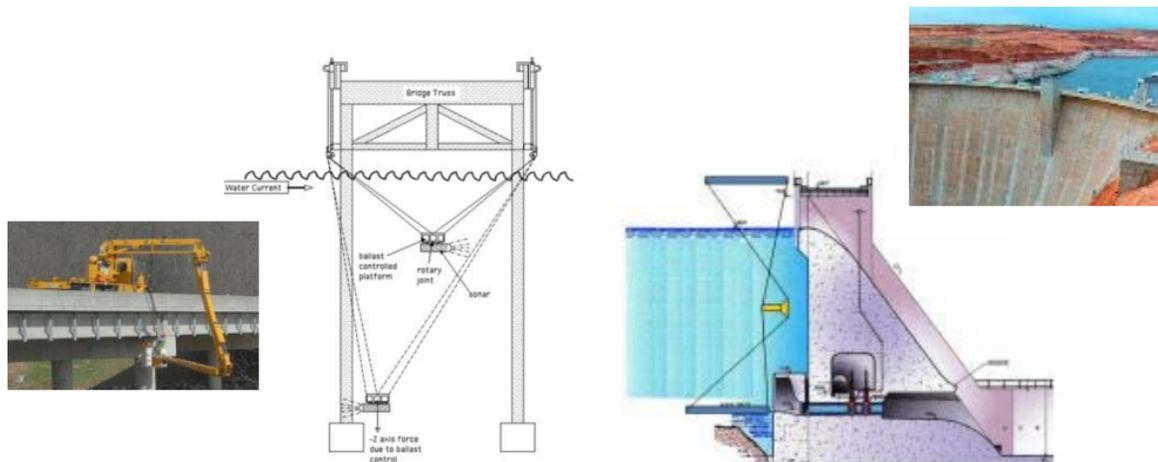
Figura 2.14: Implementación de robots con cables en el sector de la construcción y logística.



Fuente:[?]

- Ingeniería civil. Las estructuras propias de la Ingeniería Civil tales como puentes, represas, edificios, entre otros, requieren de inspecciones y mantenimientos donde la accesibilidad y el manejo de herramientas resulta sumamente complicado para la mano de obra humana. Es por esto que en estos casos resulta útil la implementación de robots con cables para la realización de dichas tareas, donde, como se observa en la Fig. 2.15, dichos robots .

Figura 2.15: Implementación de robots con cables en la Ingeniería Civil.



Fuente:[?]

Capítulo 3

Modelamiento cinemático y espacio de trabajo

En este capítulo se implementa el modelo cinemático del prototipo para las simulaciones y pruebas experimentales. Además, se muestra el espacio de trabajo del robot.

3.1. Preliminares

En la literatura se reportan varios métodos para enfrentar el proceso de modulación de estructura mecánica en RPCC en los que la cinemática esta presente en cada momento. La cinemática de los robots, estudia el posicionamiento y orientación respecto a un sistema de referencia establecido. En el análisis de la cinemática no se contemplan las fuerzas que intervienen en el robot, hace usos de las herramientas matemáticas que permiten establecer relaciones entre los valores de las coordenadas articulase, con los valores que toman la posición y orientación de algún punto del robot.

Figura 3.1: Elementos preliminares a la cinemática en RPCC

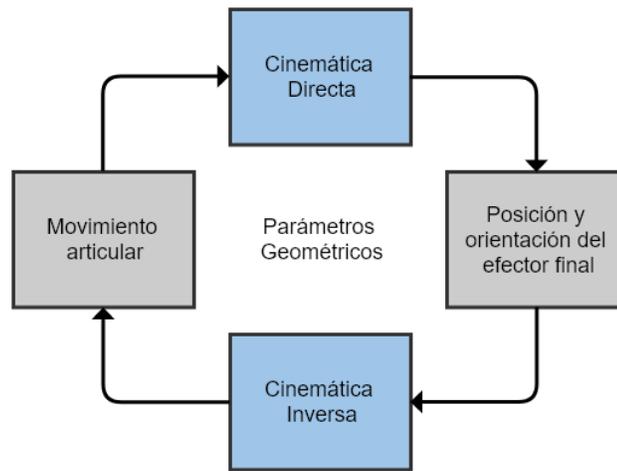


Fuente: Autor

En cuanto a los elementos preliminares a la cinemática mostrada en la Fig. 3.1, se refiere a los 3 tipos de movimiento que se destacan en la cinemática: Trayectoria, distancia y desplazamiento; ya que como definición general, la cinemática es la ciencia que estudia los tipos de movimiento y gracias a ella se han conseguido grandes avances tecnológicos.

A la hora de realizar el estudio del mecanismo del presente asistencia de investigación surge dos posibilidades: El estudio de las posiciones del sistema de poleas a partir de la posición final del efector final, o el estudio de la posición del efector final a partir de determinadas posiciones del sistema de poleas. La primera opción se conoce como la transformada cinemática inversa, y en el caso objeto de estudio es notablemente más sencilla de resolver. La segunda se denomina transformada cinemática directa, de mayor complejidad con respecto a la inversa en los robots con cables. La Fig. 3.2 muestra un esquema del proceso del cálculo llevado a cabo, para la resolución de ambos casos.

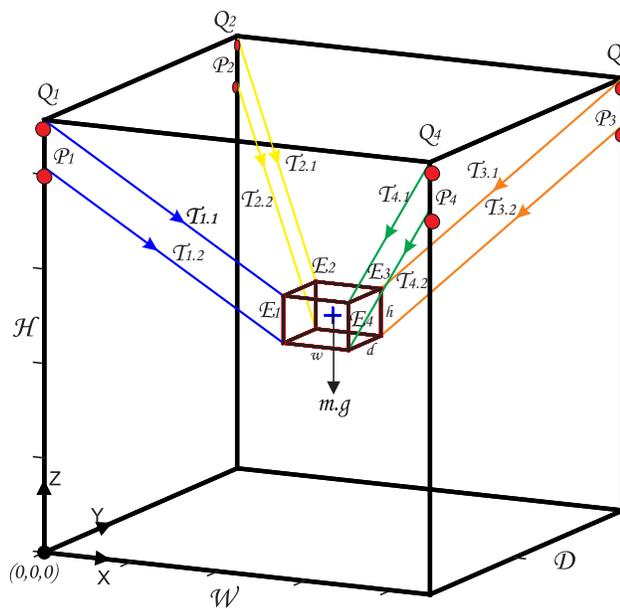
Figura 3.2: Esquema de transformaciones cinemáticas



Fuente: Autor

Esta distribución proporciona un movimiento de traslación del efector final, es decir, se mantiene una orientación constante, modificando únicamente el posicionamiento. La Fig. 3.3 muestra el esquema, nomenclatura y consideraciones previas del RPCC espacial.

Figura 3.3: Esquema, nomenclatura y consideraciones previas del RPCC



Fuente: MEC-AUTRONIC

W hace referencia a al ancho del bastidor (Plataforma fija del prototipo) que fue orientado sobre el eje X al igual que w que indica el ancho del efector final sobre el mismo eje coordenado; D que hace

referencia a la profundidad del bastidor orientado sobre el eje Y al igual que d que indica el ancho del efector sobre el mismo eje coordenado; H que hace referencia a la altura del bastidor orientado sobre el eje Z al igual que h que indica la altura del efector sobre el mismo eje coordenado.

Las coordenadas articulares del robot están denotadas como Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , al igual que la nomenclatura del sistema de poleas del RPPC P_1, P_2, P_3, P_4 es claro en cuanto a que se identifican los 4 puntos de anclaje en el bastidor para los cables, uno por cada coordenada articular, los cuales constan cada uno de una polea superior y una inferior, de igual manera que los puntos de anclaje en el efector final E_1, E_2, E_3, E_4 que constan de el mismo sistema de poleas en cuanto a dimensionamiento de poleas y distancia entre ejes, lo que permite que se forme el paralelogramo esperado entre los cables para impedir rotaciones sobre los ejes X y Y , mientras que las coordenadas del centro de gravedad del efector estarán denotadas como X_e, Y_e y Z_e .

Las tensiones de los cables están denotadas como $T_{n,m}$, donde n hace referencia al número del módulo en el que se este cable se ubique, que puede ser en este caso de 1 a 4, y m indica si es el cable superior o inferior del módulo, siendo 1 el superior y 2 el inferior.

Es conocido que dependiendo el dimensionamiento del bastidor y el efector final el RPCC espacial puede tener un grado de libertad más debido a la posible rotación que pueda tener sobre el eje Z . Esto es posible siempre y cuando se cumpla la condición $W/D \neq w/d$, pero en este caso, la plataforma fue diseñada con una base cuadrada al igual que el efector, lo que genera una relación de $1 = 1$ que anula ese grado de libertad, lo que limita a solo 3 grados de libertad (uno por cada eje coordenado) al efector final.

3.2. Cinemática Inversa

La cinemática inversa permite determinar los valores de las coordenadas articulares del efector final en las cuales debe establecerse Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , con la finalidad de poder ubicar y orientar el extremo según una determinada localización espacial X_e, Y_e y Z_e .

La Ec. 3.1 y Ec. 3.2, corresponde al planteamiento de la cinemática inversa general del robot.

$$Q_n = M^{-1} \cdot [X_e, Y_e, Z_e] \quad (3.1)$$

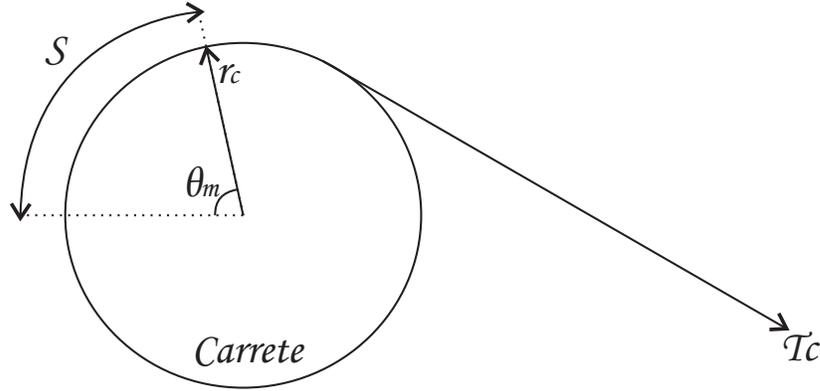
$$[X_e, Y_e, Z_e] = M \cdot Q_n \quad (3.2)$$

Como las articulaciones del robot son cables accionados, el desarrollo de la cinemática inversa solo involucra un cálculo de longitudes en las cuerdas, lo que significa un cambio de ángulo conocido en los motores, como se denota en la Ec. 3.3

$$\theta_m = \frac{S}{rc} = \frac{L_{fc} - L_{oc}}{rc} \quad (3.3)$$

Donde S hace referencia al arco de rotación del carrete, que se traduce en la diferencia entre la longitud final del cable (L_{fc}) y su longitud inicial (L_{oc}) (antes y después del movimiento), y " rc " hace referencia al radio del carrete, asumiendo un ángulo de partida en el motor (Θ_0) igual a cero. Evidentemente se obtendrá un ángulo de rotación en el motor (Θ_m) en radianes, lo que se debe tener en cuenta al momento de generar y analizar el modelamiento matemático, tal y como se muestra en Fig. 3.4.

Figura 3.4: Relación ángulo-arco en el carrete del modulo de recolección



Fuente:MEC-AUTRONIC

Teniendo en cuenta que P_1, P_2, P_3, P_4 , hace referencia a cada uno de los sistemas de poleas con los que cuenta el bastidor, y E_1, E_2, E_3, E_4 al sistema de poleas del efector final en donde se anclan los cables tal y como se muestra en la Fig. 3.3, con estos parámetros junto a las coordenadas en el espacio es posible encontrar las ecuaciones para el calculo de las longitudes de los cables.

$$L_1 = \sqrt{(X_{P1} - X_{E1})^2 + (Y_{P1} - Y_{E1})^2 + (Z_{P1} - Z_{E1})^2} \quad (3.4)$$

$$L_2 = \sqrt{(X_{P2} - X_{E2})^2 + (Y_{P2} - Y_{E2})^2 + (Z_{P2} - Z_{E2})^2} \quad (3.5)$$

$$L_3 = \sqrt{(X_{P3} - X_{E3})^2 + (Y_{P3} - Y_{E3})^2 + (Z_{P3} - Z_{E3})^2} \quad (3.6)$$

$$L_4 = \sqrt{(X_{P4} - X_{E4})^2 + (Y_{P4} - Y_{E4})^2 + (Z_{P4} - Z_{E4})^2} \quad (3.7)$$

En las trayectorias se generar n cantidad de puntos que describen el numero de valores totales que tendrán las coordenadas articulares del robot, lo que lleva una iteración de $n - veces$ para el calculo de las longitudes de cada cable en punto de la trayectoria.

3.3. Cinemática Directa

La cinemática directa permite, mediante relaciones matemáticas, determinar los valores de las coordenadas espaciales de posición y orientación de un punto en el efector final, denominado limite operativo, a partir de la información de los valores de las coordenadas articulares que va transmitir el sistema recolector, en este caso, los cuatro ángulos de rotación de los motores (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4).

Similar a la cinemática inversa, se parte de un ángulo de rotación en los motores $\theta = 0$, además se calcula las longitudes iniciales de los cables en la posición inicial del efector final siendo la siguiente: $X = W/2, Y = D/2$ y $Z = H/2$.

La Ec. 3.8, corresponde al planteamiento de la cinemática directa general del robot.

$$x = [M][Q_1, Q_2, Q_3, Q_4] \quad (3.8)$$

Siendo x , el vector que contiene los valores de posición y orientación del limite operativo, q representa los valores de las coordenadas articulares y M se denomina matriz de transformación que permite establecer la relación matemática entre q y x .

3.4. Espacio de Trabajo

El ajuste en los cables del efector final diseñado para el prototipo de RPCC puede realizarse con facilidad en cualquier punto mediante el mecanismo de clavijas, implementado en los instrumentos musicales para la tensión en la cuerdas. Además la distancia que deben tener los cables debe ser iguales al sistema de poleas del prototipo y su inclinación totalmente paralela respetando cuya distancia. Estos parámetros hacen que el efector final ocupe un espacio.

Por esta razón el espacio del trabajo no sera 100 % efectivo en el prototipo, lo que lleva a que mediante mediante la utilización de matrices Jacobinas Ec. 3.9 en un entorno de desarrollo integrado (IDE) como Matlab, para dar solución a los sistemas de ecuaciones generados, se puedan encontrar todos los valores que tomaran las tensiones tanto en el RPCC planar como espacial y así identificar los puntos coordenados donde el efector final tendrá un comportamiento aceptable en sus recorridos y donde no los tendrá, logrando así la identificación del espacio de trabajo.

$$\mathcal{M}_J = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 * \cos\alpha_1 & \cos\beta_2 * \cos\alpha_2 & \cos\beta_3 * \cos\alpha_3 & \cos\beta_4 * \cos\alpha_4 \\ \cos\beta_1 * \sin\alpha_1 & \cos\beta_2 * \sin\alpha_2 & \cos\beta_3 * \sin\alpha_3 & \cos\beta_4 * \sin\alpha_4 \\ \sin\alpha_1 & \sin\alpha_2 & \sin\alpha_3 & \sin\alpha_4 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Teniendo β y α como los ángulos de los cables para hallar sus componentes en el plano X, Y .

Este proceso esta directamente afectado por variables como: la masa del efector, el torque de trabajo de los motores y la relación de transmisión de la caja de reducción implementada. Variables que se deben tener en cuenta para generar las restricciones de trabajo del robot, y así, continuar con la determinación del espacio de trabajo.

La caja de reducción (tornillo - sin fin) implementada para este robot aporta una relación de transmisión de 10:1, lo que afecta directamente al torque de salida del motor Nema 23 que se uso en esta plataforma que inicialmente es de 1.8 $N.m$. Esto mismo también afecta la restricción establecida para la determinación del espacio de trabajo que indica que el torque ejercido por las tensiones de los cables en el carrete de recolección no puede superar el torque máximo de el motor, debido a que el torque máximo a vencer con la caja de reducción sera de 18 $N.m$. La tensión mínima permisible en los cables se fijo como el 90 % del peso del efector final ($m.g$).

Con estas restricciones establecidas es posible identificar el espacio de trabajo del robot espacial Fig. 3.6, teniendo como porcentaje de espacio de trabajo aceptable un 51.74 % en el espacial y de su adaptación a robot planar Fig. 3.5 teniendo como porcentaje de espacio de trabajo aceptable un 74.52 %.

Figura 3.5: Espacio de trabajo RPCC planar

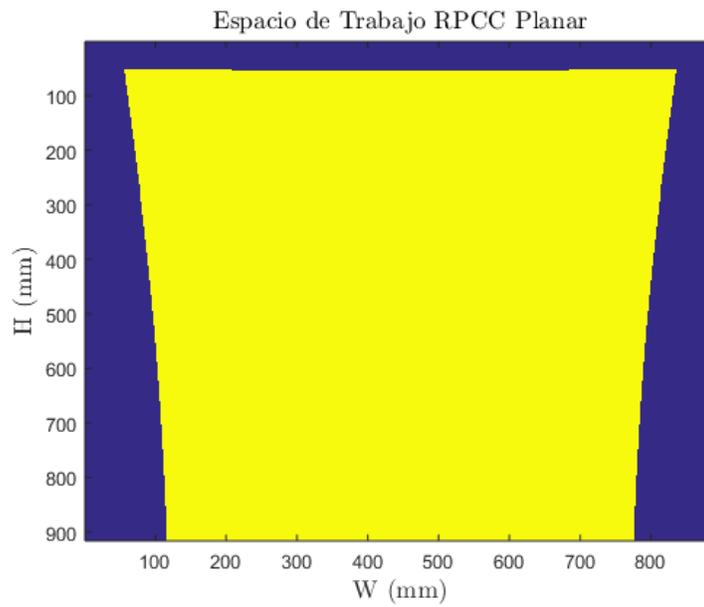
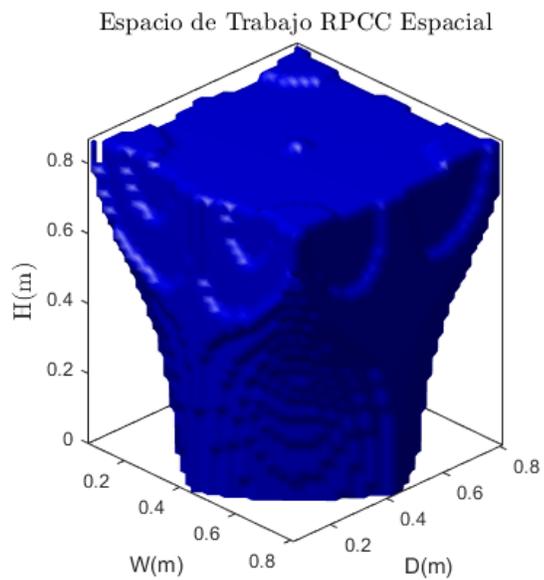


Figura 3.6: Espacio de trabajo RPCC espacial



3.5. Generación de trayectorias

La generación de trayectorias simuladas para posteriormente generar los ángulos para la aplicación en el RPCC se hace posible gracias a la implementación de un software con IDE, en este caso Matlab.

Contando con el desarrollo de la cinemática inversa expuesta en este mismo capítulo, lo que complementa la generación de trayectorias es la implementación de polinomios de Bezier para generar de la mejor forma posible la trayectoria. El establecimiento de estos polinomios generan una interpolación entre todos los puntos que describen una trayectoria, y dependiendo su longitud de la trayectoria y la geometría que estos puntos describan, se genera una aproximación a los mismos sin necesidad de pasar por ellos.

Aplicando esto en el RPCC desarrollado, los resultados al generar las trayectorias no serán totalmente los anteriormente expuestos, debido las pruebas geométricas establecidas para verificar su correcto funcionamiento son en su mayoría líneas totalmente rectas, como por ejemplo, un cuadrado, por lo cual se llama la función que utiliza el polinomio de Bezier para cada una de las trayectorias lineales que este posea. Mas sin embargo, se implemento este tipo de polinomios con su grado 3 debido también a que generan una "suavización" de la trayectoria, lo que evita aceleraciones y desaceleraciones bruscas al inicio y al final del recorrido del efector 3Dr, lo que si no es garantizado puede causar una desestabilización en el mismo y por ende errores de exactitud y precisión, dicha suavización que sera evidente en cada una de las coordenadas articulares encontradas para el robot.

Cabe resaltar que la implementación de estos polinomios de Bezier solo son aplicables cuando se cuenta con la cinemática inversa de las plataformas, ya que se conoce con anticipación las coordenadas o puntos en un plano o en el espacio que debe tener la trayectoria a cumplir por un efector 3D, mientras que con la cinemática directa los ángulos ingresados para el movimiento del efector 3D ya deben cumplir con estas características de suavización si esto es lo que se desea.

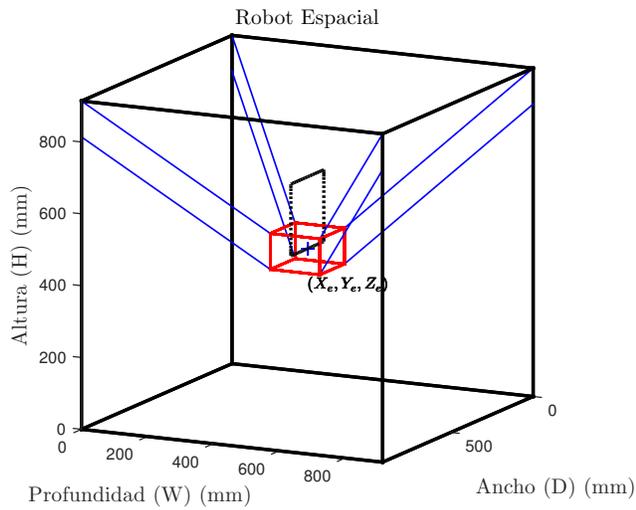
Se implementa un grado 3 en el polinomio de Bezier debido a que se garantiza una variabilidad, partiendo de posición, y así poder encontrar el polinomio que garantiza velocidad y aceleración como se muestra en Ec. 3.10. Los resultados de estas interacciones se podrán evidenciar en los perfiles de velocidad obtenidos para cada una de las trayectorias realizadas en el capítulo de *Resultados*.

$$\mathcal{B}_Z = \begin{bmatrix} t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Teniendo como parámetros de entrada t_0 que hace referencia al tiempo inicial o de partida de la trayectoria y t_1 al tiempo final estipulado de la trayectoria. Los ejemplos de trayectorias espaciales simuladas que se van a realizar en la parte experimental son:

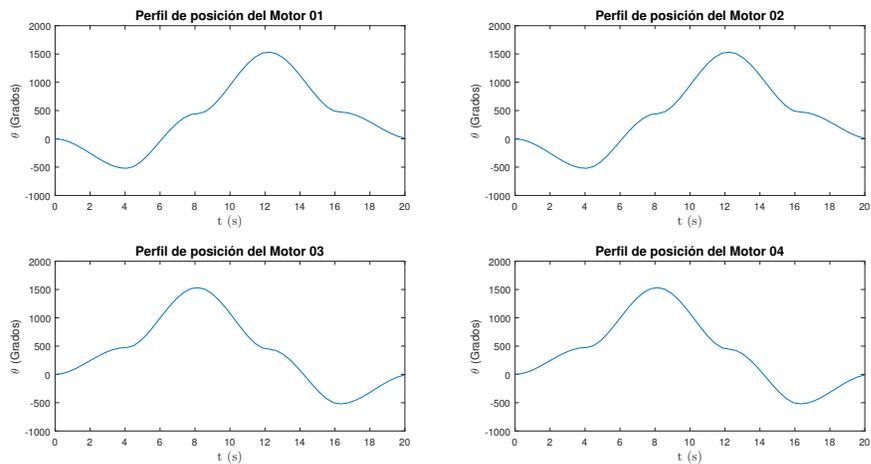
3.5.1. Trayectoria Cuadrado RPCC espacial

Figura 3.7: Trayectoria cuadrada espacial 200x200mm plano Y – Z



Fuente: MEC-AUTRONIC

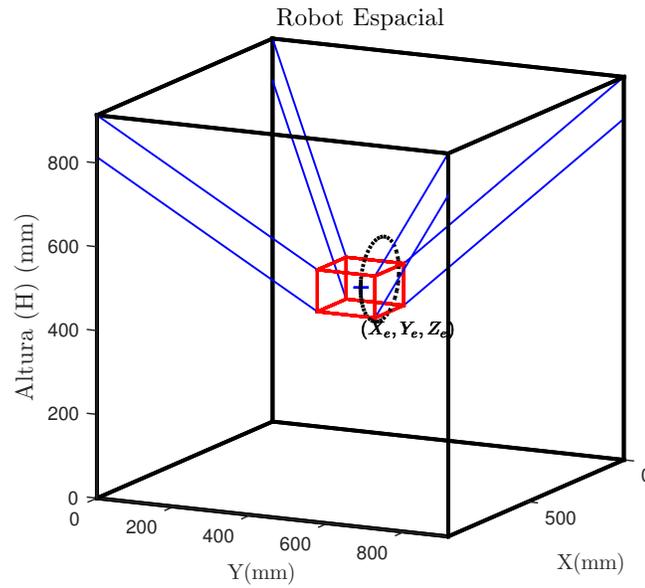
Figura 3.8: Perfil de posición de los motores trayectoria cuadrada 200x200mm



Fuente: MEC-AUTRONIC

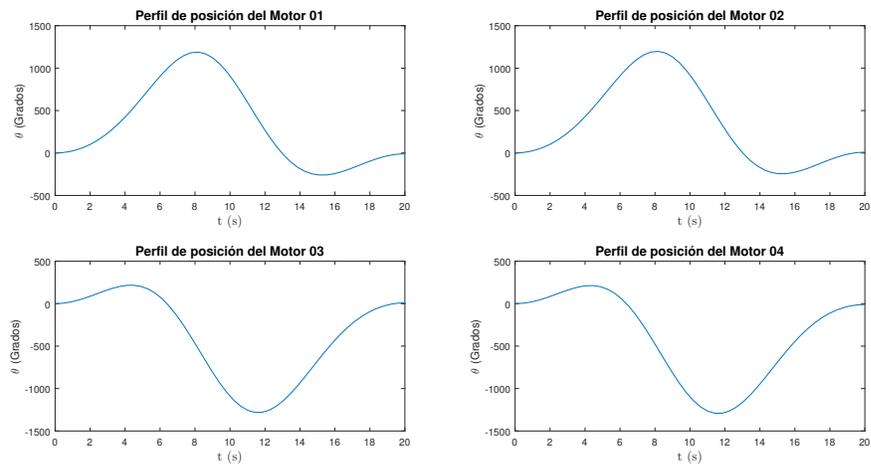
3.5.2. Trayectoria Circulo RPCC espacial

Figura 3.9: Trayectoria circular espacial radio 75mm plano $Y - Z$



Fuente: MEC-AUTRONIC

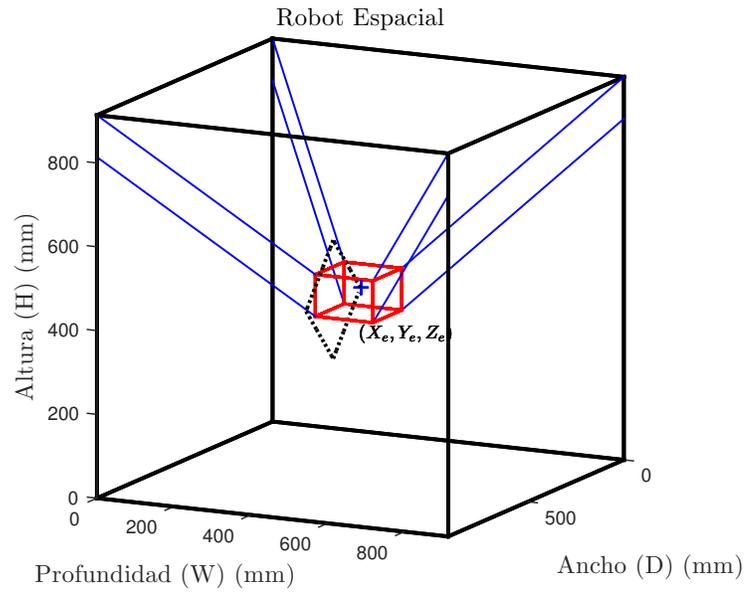
Figura 3.10: Perfil de posición de los motores trayectoria circular espacial radio 75mm



Fuente: MEC-AUTRONIC

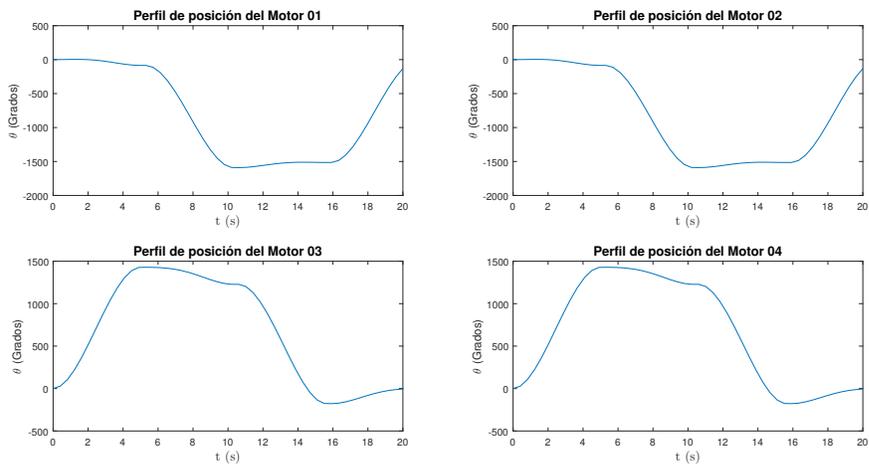
3.5.3. Trayectoria Rombo RPCC espacial

Figura 3.11: Trayectoria de rombo espacial de 150x150mm plano $Y - Z$



Fuente: MEC-AUTRONIC

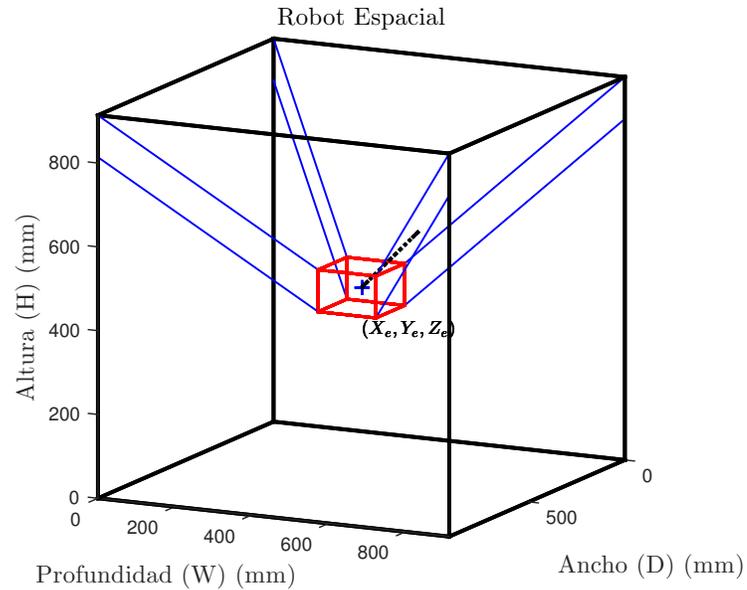
Figura 3.12: Perfil de posición de los motores trayectoria de rombo espacial 150x150mm



Fuente: MEC-AUTRONIC

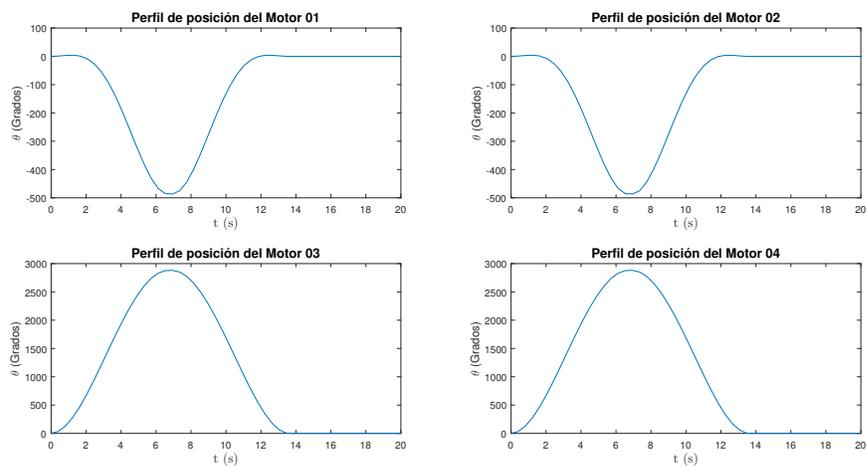
3.5.4. Trayectoria Linea RPCC espacial

Figura 3.13: Trayectoria Lineal espacial de 100mm en el plano $Y - Z$



Fuente: MEC-AUTRONIC

Figura 3.14: Perfil de posición de los motores trayectoria lineal espacial de 100mm



Fuente: MEC-AUTRONIC

Capítulo 4

RPCC-LAB: Prototipo para laboratorio

En este capítulo se describe y analiza los componentes mecánicos que conforman el robot con cables.

4.1. Parámetros de diseño

RPCC-LAB conste de 3 GDL, en la zona superior se encuentra el sistema recolector. Este consta de un motor PaP (Nema 23) que esta sujeto bajo una caja de reducción 10:1 (Corona Sin-Fin), transmitiendo movimiento rotacional a un tornillo de potencia de paso 8mm para el desplazamiento del carrete. Internamente el carrete cuenta con 6 capas en acrílico que sostienen 2 rodamientos lineales, permitiendo el desplazamiento lineal. Este desplazamiento esta sujeto con dos ejes guías en acero que están acoplados en sus extremos con 2 soportes fijos en acrílico.

El material usado para la estructura es aluminio ya que posee una buena resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión y poco peso. Adicionalmente el aluminio es un material de bajo costo y fácil de encontrar en el mercado. El tipo de aluminio utilizado es una aleación 6060-T6 ya que esta aleación es la utilizada para la fabricación de perfiles.

Los perfiles y el sistema recolector están sujetos bajo la compresión de capas en Tableros de Fibra de Densidad Media (MDF), en diferentes espesores (2,5,5,5 y 9)mm. La ventaja del MDF es un material bajo en costo, bastante comercial, de poco peso y la fabricación de piezas es ágil, ya que la mayor dificultad de los RPCC es su sistema recolector se busco una alternativa de unión de su estructura rápida y funcional. Con impresión 3D su dificultad fueron piezas demoradas y con su ensamblaje fracturaban con rapidez optando al MDF.

En las columnas del sistema se encuentra unido el sistema de poleas realizados en impresión 3D con material Poliacido Láctico (PLA) y algunos componentes en MDF, en el permite la guía de los cables hacia el efector final. Este efector esta fabricado con perfiles de aluminio, PLA y MDF, en su centro consta de un tornillo que sujetara los pesos con los que se realizará las pruebas experimentales.

Procediendo así el diseño en una plataforma CAD (Diseño Asistido por Computadora), como lo es *SolidWorks*, para su posterior fabricación.

4.2. Selección de materiales

Para el diseño del RPCC lo primero que se ha tenido en cuenta son los materiales que se utilizaran posteriormente para la fabricación de los distintos elementos que lo componen.

4.2.1. Tablero de Fibra de Densidad Media (MDF)

Como se dijo en la introducción del proyecto, uno de los procesos de fabricación que mas se utilizara para su facilidad de puesta en marcha, velocidad de fabricación y obtención de piezas, sumada a su capacidad de formación de piezas resistentes y rígidas en función de capas es el corte a láser.

El material utilizado es MDF, este tipo de tablero esta fabricado a partir de fibras de madera aproximadamente un 85 % y resinas sintéticas comprimidas un 15 %, lo que le aporta una mayor densidad de la que presentan aglomerados tradicionales o la madera contrachapada. Por la facilidad que ofrece en moldear, fresar, routear y pintar permite crear un sinfín de piezas a base de capas aportando resistencia y rigidez.

Tabla 4.1: Propiedades mecánicas del MDF

Materiales	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia interna (MPa)	Absorción de superficie (mm)
MDF	7,3	35	3,5	0,7	<150

Este material se suele vender en láminas de 244x122 cm y espesores de [2.5,4,5.5 y 9] mm.

4.2.2. Poliacido Láctico (PLA)

Para los procesos de fabricación de piezas en el que sus geometrías son complicadas como el recolector y algunas piezas rígidas, se optó a la impresión 3D. El material utilizado es el PLA, polímero biodegradable derivado de la cascara del maíz, muy interesante de estudio y posee las siguientes características:

- El PLA es un polímero permanente e inodoro
- Resistente a la humedad y a la grasa (dato importante, debido a que los mecanismos que tengan elementos de este material podrán engrasar para su mejor funcionamiento)
- - La fuerza extensible y el módulo de elasticidad del PLA es también comparable al polietileno, pero tiene una densidad más baja. Su inflamabilidad es demasiado baja
- El PLA se puede formular para ser rígido o flexible y puede ser copolimerizado con otros materiales. El PLA se puede hacer con diversas características mecánicas dependiendo del proceso de fabricación seguido.

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas del PLA

Material	Densidad (g/cm ³)	Limite elástico (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Punto de fusión (°C)	Alargamiento (%)
PLA	1,25	57,8	3,3	170	35

Este material se suele vender en carretes de 1kg en forma de filamento de 1.75mm o 3 mm de diámetro. Para poderlo introducir en la impresora 3D dependiendo del extrusor que utilice.

4.2.3. Nylon

Como sabemos que la impresión 3D da facilidad en la fabricación de piezas con geometrías complejas. Se usó también, para la obtención de piezas con mayor resistencia al desgaste, en la fabricación de cajas de reducción. Se implemento el Nylon (polímero semi-cristalino), posee las siguientes características:

- Resistencia mecánica, dureza, rigidez y buena tenacidad
- Fuerte capacidad de amortiguación mecánica
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia al desgaste
- Buenas propiedades de deslizamiento
- Elevada absorción de humedad
- Estabilidad dimensional reducida

- Funciona muy bien con lubricación, son silenciosas

Tabla 4.3: Propiedades mecánicas del Nylon

Material	Densidad (g/cm ³)	Limite elástico (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Punto de fusión (°C)	Alargamiento (%)
Nylon	1,14	75 - 95	2,8	260	>50

Este material se suele vender en carretes de 1kg en forma de filamento de 1.75mm o 3 mm de diámetro. Para poderlo introducir en la impresora 3D dependiendo del extrusor que utilice.

4.2.4. Aluminio

Con mayor redundancia, este material se usará para los perfiles de la estructura, que a diferencia de algunos robots cartesianos convencionales, como el caso de las impresoras 3D, como puede ser la impresora “Prusa Mendel i2” o la “Mendel Max”, que usan un chasis con varillas M8 de sección circular maciza de acero dándole mucho peso a la máquina, el chasis del RPCC constará de barras de aluminio que darán cierta ligereza a la estructura debido a su baja densidad con respecto al acero manteniendo una alta resistencia.

El fabricante indica que las barras de aluminio son la serie 6060-T6 que tiene las siguientes propiedades:

Tabla 4.4: Propiedades mecánicas del Aluminio

Material	Densidad (g/cm ³)	Limite elástico (MPa)	Carga de rotura (MPa)	Alargamiento (%)
Aluminio	2,7	250	295	8

Cabe mencionar que las barras son de aluminio lacado. El lacado del aluminio es un procedimiento especial de protección de la superficie de los perfiles de aluminio con una capa de pintura aplicada. Puede ser en polvo o líquida.

- Lacado con pintura líquida: Tiene como vehículo de aplicación del recubrimiento un disolvente, el cual debe evaporarse para obtener posteriormente la capa protectora de resina pigmentada
- Lacado con pintura en polvo: Se aplica pulverizando un polvo de resina que se deposita electrostáticamente, hasta obtener el espesor de capa protectora de resina pigmentada. Como paso final, la capa se endurece llevándolo a horno

Los objetivos de lacado son:

- Mejorar el aspecto estético
- Mejorar las propiedades físicas del aluminio

El Aluminio suele venderse en perfil cuadrado de 6m de longitud con una sección tubular de 19.2x19.2x.2 mm.

4.3. Componentes del robot

4.3.1. Estructura del robot

Normalmente, las estructuras de los robots convencionales comandados por cables suelen tener una geometría distinta dependiendo de la aplicación que se desarrolle. Por ejemplo, un robot por cables que esté diseñado para transportar cargas no tendrá la misma estructura que un robot que esté diseñado para obtener medidas. Por ello, alguien se tiene que plantear qué estructura viene mejor en cada caso. Para el ejemplo anterior, la estructura de un robot para transportar cargas es compleja en el sentido de que se necesita una estructura reforzada que sea capaz de soportar esfuerzos y tensiones elevadas. Por otro lado, para un robot diseñado para obtener medidas, la estructura debe ser capaz de absorber las vibraciones y no transmitir las al efector final.

Hay que tener en cuenta que la principal aplicación para el robot que se está diseñando es estudiar el movimiento del efector final con fines meramente educativos y de investigación. Por ello, para el diseño del chasis se ha tenido en cuenta que éste tenga una geometría sencilla, lo primero de todo, para que el posterior montaje no presente dificultades.

Se ha optado por una estructura rectangular, modular y simétrica por los dos ejes de la planta para facilitar la fabricación, el montaje y desmontaje.

4.3.1.1. Perfiles de la estructura

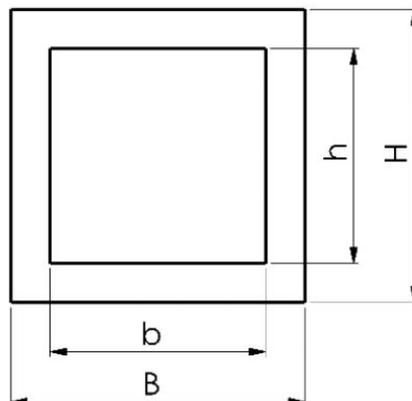
Para la estructura se usará perfiles de aluminio lacado blanco. Por su baja densidad con relación a la alta resistencia que presentan, nos entra perfecto para la estructura, ya que el robot no va a trabajar con pesos elevados.

La sección escogida para las barras de aluminio es una sección cuadrada de 19.2x19.2x2 mm, ya que la sección cuadrada posee mayor inercia. Sin embargo, el dato que puede interesarnos es el de máximo momento flector que se puede calcular en la Ec. 4.1.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{min}} \quad (4.1)$$

Donde M es el momento flector que debe soportar y W el momento resistente de la sección.

Buscando una tabla de fórmulas de momentos resistentes dependiendo de la sección, se puede observar que, para una sección cuadrada hueca, el momento resistente se puede calcular en la siguiente ecuación Ec. 4.2.



$$W = \frac{HB^3 - hb^3}{6B} = \frac{(19,2)x(19,2)^3 - [(15,2)x(15,2)^3]}{(6)x(19,2)} = 716,28mm^3 = 716,3mm^3 \quad (4.2)$$

Entonces sabiendo que el limite elástico es de 250MPa y la Ec. 4.1, el momento flector quedará del siguiente modo:

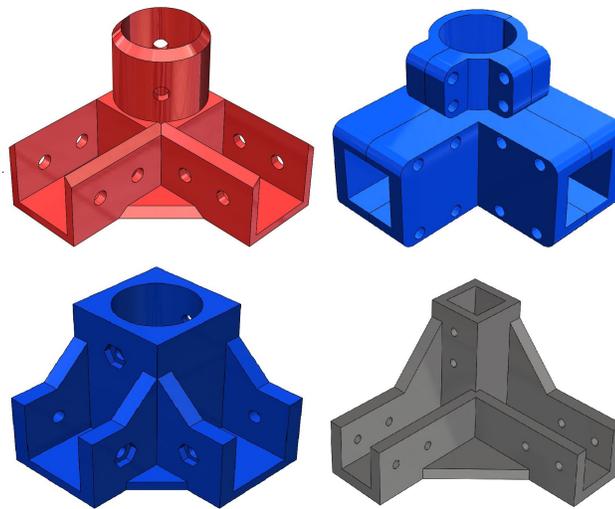
$$Mmax = (\sigma max)x(Wmin) = \frac{(250)x(716,3)}{1000} = 179,075Nm = 179,1Nm \quad (4.3)$$

4.3.1.2. Uniones entre los perfiles

Para la unión de los perfiles de aluminio se han diseñado con el propósito tanto modular, como rígido y resistente, es decir, como se necesita una estructura fija, en donde no haya bajo su funcionamiento vibraciones, ni movimiento y en su montaje los perfiles de aluminio no sean afectados bajo a penetraciones.

Para llegar allí, se realizaron cierto modelos de uniones modulares en impresión 3D, que comprometerían los perfiles de aluminio, como se observa a continuación en la Fig. 4.1. Dichas uniones tardan entre 1:30 a 3 horas para su fabricación y montaje, además que no aportaban rigidez a la estructura, si no que pivotada generando inestabilidad al robot.

Figura 4.1: Uniones fabricadas por impresión 3D.

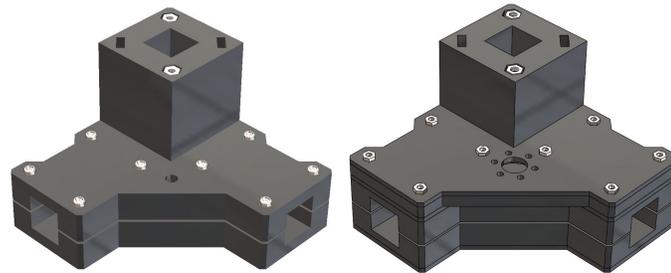


Fuente: Autor

Para este problema se optó a una solución factible y rápida en su fabricación, el cual fue el corte a láser en MDF, ya que es un prototipo para posteriores investigación no necesita materiales que demanden peso y dureza. Como se nota en la Fig. 4.2, se fabricó la unión con base a capas en MDF de diferentes tamaños, que dan la medida casi precisa del perfil de aluminio, al momento que se compactan las capas, el espacio faltante que es de 1.2mm, hace que el MDF se adhiera a los perfiles de aluminio dando firmeza y rigidez a la estructura.

Cabe de recalcar que la unión del costado derecho que se ve en la Fig. 4.2, además de servir como acople en los perfiles, también es donde va ir empastado el sistema de poleas para su posterior funcionamiento.

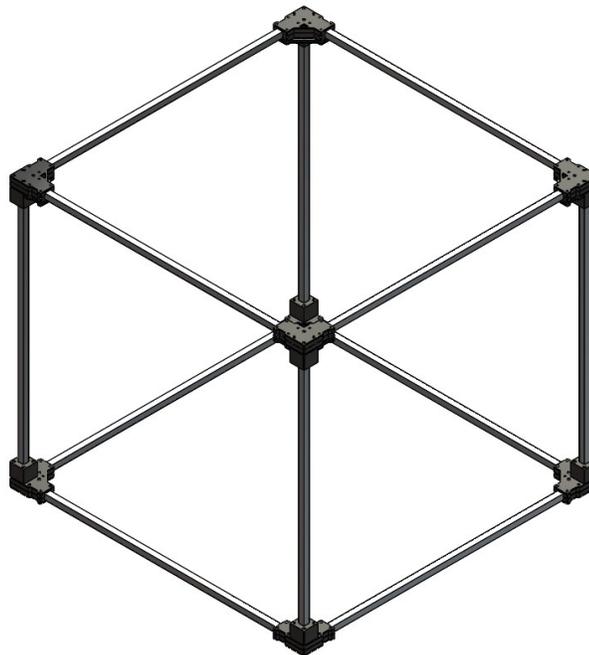
Figura 4.2: Uniones fabricada por corte a láser en MDF



Fuente: Autor

En la Fig. 4.3, todos los perfiles de aluminio están acoplados a compresión por las capas de MDF, dando firmeza a la estructura. Estas uniones esta unidas mediante tornillo M3X30 mm. El propósito principal de realizarlo de esta manera es la facilidad de trasladarlo de un lugar a otro, si se hubiera remachado o unido las uniones con los perfiles mediante tornillos, hubiera quedado también una estructura sólida, pero sin poderla desmontar y difícil de trasladar.

Figura 4.3: Marco del robot y uniones entre los perfiles

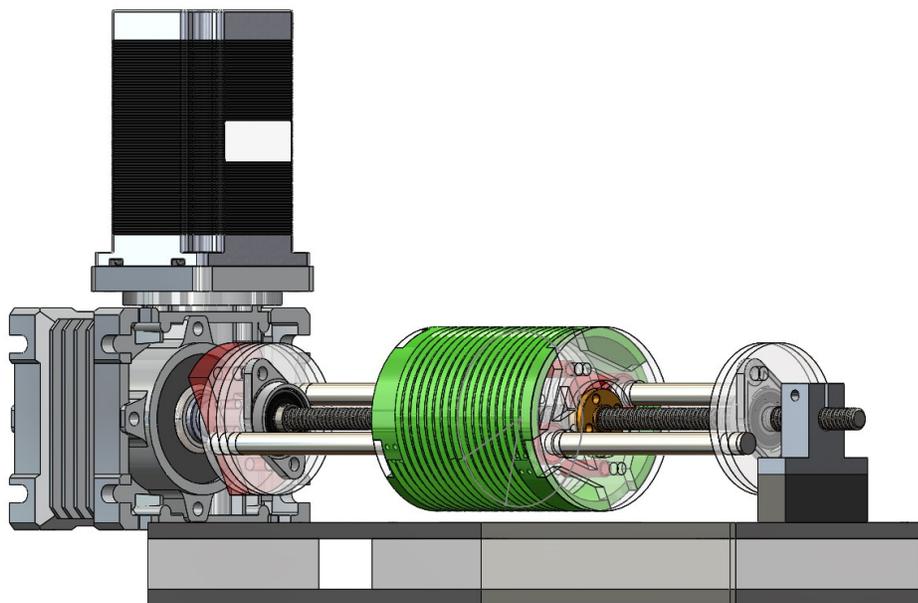


Fuente: Autor

4.3.2. Sistema Recolector

Este ítem es uno de los más importantes y relevantes del proyecto, con el se definirá tanto la precisión, como la suavidad del movimiento en el robot. Su dificultad es alta por que requiere plantear un mecanismo accionado mediante una motor Paso a Paso (PaP) que consiga mover el cable en una especie de polea roscada (Carrete), sin alterar su desplazamiento de manera brusca o poco usual en el efecto.

Figura 4.4: Sistema recolector

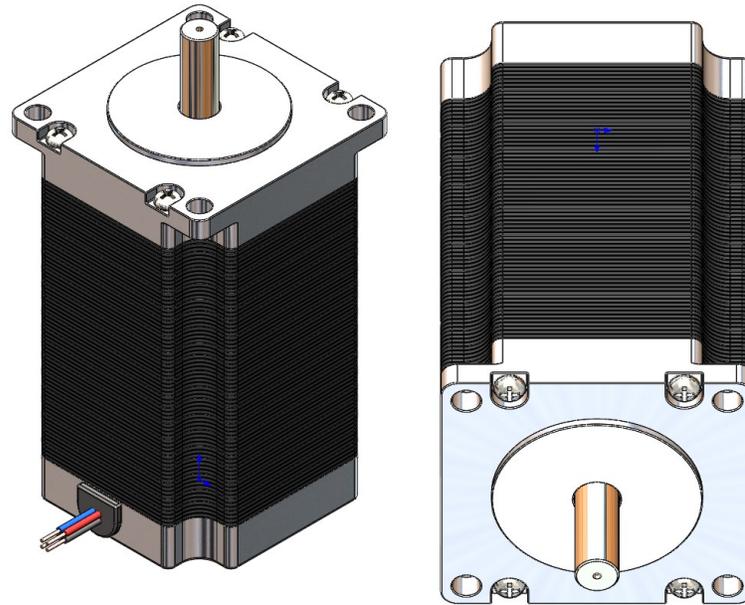


Fuente: Autor

En la Fig. 4.4, se observa todos los componentes que va unido el sistema recolector, para entrar un poco en detalle, el carrete que es el componente que va a enrollar y soltar los cables va a estar desplazándose bajo el movimiento de un eje roscado que estará acoplado a un motor (PaP). Se hizo de esta manera, ya que la sección roscada es un parámetro que se puede hallar fácilmente y usarlo en la programación del robot para su control, aportando precisión en el movimiento del cable.

Motor Nema 23 NEMA es un estándar (NEMA significa Asociación de Fabricantes Nacionales Eléctricos, de EEUU) que define el tamaño de la carcasa y disposición de los agujeros de un motor paso a paso y no define ninguna característica eléctrica, de par ni de consumo. Un motor NEMA 23 como se ve en la Fig. 4.5 tiene 112 milímetros de base y tiene los agujeros (M4) sobre esta base separados 47.1mm. Este motor otorga un ángulo de paso de 1.8 grados, dando 200 pasos/Vuelta. con 4 fases y una corriente de 2 A/Fase, con un voltaje de 4.5 V y un torque con las anteriores condiciones de alimentación de 14 Kg/cm.

Figura 4.5: Motor Nema 23



Fuente: Autor

Un motor paso a paso es un tipo de motor eléctrico en cuyo interior existen dos bobinas eléctricas que conectadas alternativamente producen el giro de un rotor (el movimiento del eje). Al activar una bobina el rotor gira un ángulo muy pequeño llamado paso o step. Al activar la otra bobina (desactivando la anterior) se mueve otro paso, y así avanza. Permiten controlar la posición, ya que es posible controlar el número de pasos de avance de los motores. Estos motores son utilizados en dispositivos que requieren control de la posición, como es el caso de este robot. Adicionalmente, conectando las bobinas a la vez se consigue que el rotor se quede en una posición intermedia.

En el caso de nuestro robot, el motor deberá ir configurado dependiendo la cinemática del mecanismo que se hallará en los siguientes apartados. Además se debe tener en cuenta el peso máximo que puede lograr levantar estos motores, está dado de la siguiente forma:

- $T = 30Nm$
- $r = 64/2 \text{ mm} = 32 \text{ mm} = 0,032m$

Torque es igual a fuerza por distancia por lo que esta dada en la siguiente ecuación Ec. 4.4.

$$T = [F]x[r] \quad (4.4)$$

Conociendo el toque máximo a la salida de la caja de reducción y el diámetro del carrete que seria la distancia en la cual el cable estará actuando despejamos Fuerza dando la siguiente ecuación Ec. 4.5.

$$F(max) = \frac{T(max)}{r} \quad (4.5)$$

Reemplazando los valores da el siguiente resultado:

$$F(max) = \frac{30Nm}{0,032m} = 937,5N \quad (4.6)$$

Una vez obtenido la fuerza máxima en la Ec. 4.5, se divide con respecto a la gravedad para obtener la masa máximo que puede levantar 1 motor.

$$M = \frac{937,5N}{9,81\frac{m}{s^2}} = 95,56kg \quad (4.7)$$

Por lo que 4 veces está masa es lo que puede levantar el prototipo, dando el siguiente resultado:

$$F(max) = [95,56Kg]x[4] = 382,24Kg \quad (4.8)$$

4.3.2.1. Cable

Una de las partes principales en el montaje de nuestro robot, es sin duda, los hilos o cables, y es que a muchos robots con cables les surgen infinidad de dudas a la hora de decidirse por que hilo o cable comprar y cual es mejor para cada aplicación, ya que suelen sufrir elongaciones y deformaciones que perjudican el funcionamiento de estos robots.

A veces nos cueste decidir, ya que en el mercado existen varias gamas en calidad y usos para los hilos y cables, ya sean hilos invisibles, hilos fabricados en fluoro-carbono finos y resistentes, hilos dyneema de altas resistencias, líneas mono-filamentos, cables industriales, guallas y multifilamento de alta calidad, fluorine, hilos trenzados para jigging, hilo del nanofil o madejas de nylon a precios al más baratos. Optamos por cables de pesca ya que son económicos y alcanza a levantar pesos considerables para nuestra aplicación e incluso tendremos una amplia gama de marcas a elegir, las más conocidas son Seaguar, Shimano, Sunline, Varivas, Berkley, Tubertini, Daiwa, Spiderwire, Akami, Golden Fish Ocaña, AwaShima, YGK, Power Pro, Kali Kunnan, Zun Zun, Sufix entre otras. Es por tanto que las posibilidades son infinitas.

Figura 4.6: Cable para pescar trenzado marca spiderwire



Fuente:[6]

El material que se compro como se observa en la Fig. 4.6, es hilo de pesca trenzados. Este tipo de hilos para pescar son la evolución tecnología llevada prototipos de RPCC a una forma más práctico

de hacer investigaciones y estudios en ellos. Las líneas trenzadas constan de varias hebras entrelazadas entre sí, dando mayor resistencia y flexibilidad en comparación con otras líneas. Al utilizar los trenzados ganas en sensibilidad y eficacia en la tensión, además de darte la posibilidad de levantar grandes piezas sin el temor a que la línea rompa en el último momento. Los materiales principales que utilizan los fabricantes en este tipo de sedales son el Dyneema, el kevlar y otros componentes de alta resistencia con diámetros realmente finos. Los trenzados son muy utilizados en la pesca al jigging por el gran tamaño y kilaje de las capturas en este estilo. Debes saber que cuando se excede del peso de que este hilo pueda levantar empieza a deformarse y salir brechas, decir que al carecer de elasticidad pueden formarse los temidos “nidos de pájaro” o enredos en nuestro carrete, que nos darán irregularidad de movimiento, además que el sistema empieza a estancar y colapsar. En hilos trenzados de dyneema, las mejores marcas son Awasima, Golden Fish Ocaña, Spiderwire, Power Pro, Berkley, Sufix, Tubertini entre otras .

Una forma de hallar esa elongación del hilo para pescar trenzado esta dada en el siguiente Ec. 4.9.

$$Mf(x) = \frac{d}{dx}x(EIc \frac{dy}{dx}) = \frac{d^2y}{dx^2}EIc \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{Mf(x)}{EIc} \quad (4.9)$$

Donde:

- $y(x)$ es el desplazamiento de la curva elástica
- $\frac{d^2y}{dx^2}$ es la curvatura del cable
- E es el módulo de Young del material del cable ($E= 1300\text{MPa}$)
- Ic es el momento de inercia de la sección del cable ($Ic= \frac{1}{4}\pi r^4$)

Mirando en cualquier tabla de momentos flectores según la sección transversal, se da la siguiente Ec. 4.10.

$$Mf = \frac{\sigma \pi d^3}{32} \quad (4.10)$$

Donde:

- σ es la tensión máxima del material del cable ($\sigma=966\text{MPa}$)
- d es el diámetro del cable ($d= 0.8\text{mm}$)

Calculando se obtiene el siguiente resultado despejando la ecuación Ec. 4.9.

$$Mf = \frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}} = \frac{E \frac{1}{4}\pi r^4}{\frac{\sigma \pi d^3}{32}} = \frac{(1300 \times 10^6) (\frac{1}{4}) (\pi) (\frac{0,8 \times 10^{-3}}{2})^4}{\frac{(966 \times 10^6) (\pi) (0,8 \times 10^{-3})^4}{32}} = 0,67\text{mm} \quad (4.11)$$

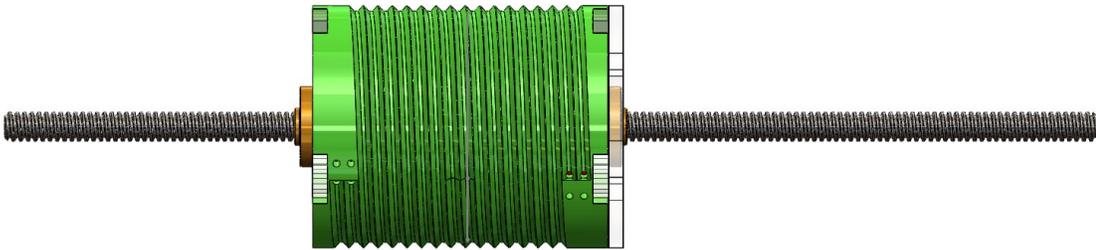
La Ec. 4.11, nos arroja el resultado obtenido, como como el diámetro mínimo en que el cable puede alcanzar sin causar deformación. Sin embargo, este problema no aparece para cables en acero ya que posee resistencias y tensiones mayores .

Para la fuerza máxima que puede levantar el cable es de 500lb que son aproximadamente 227Kg, este es el peso que llega a su diámetro mínimo antes de deformarse.

4.3.2.2. Conjunto carrete y eje roscado

La función de este conjunto será transferir el movimiento del motor al efector final a través de cables en el mecanismo. Este consta de cuatro mecanismos y el efector final estará sujeto con ocho cables, es decir, de cada mecanismo saldrán dos cables. Por lo tanto, se diseña el bombo de manera que tenga dos ranuras con el mismo paso. El carrete, además, constará de un agujero central roscado con el mismo paso que la ranura por donde circula el cable y tornillo de potencia, permite al punto de apoyo entre el mecanismo y el cable mantenerse siempre en el mismo sitio, como se puede ver gráficamente en la Fig. 4.7.

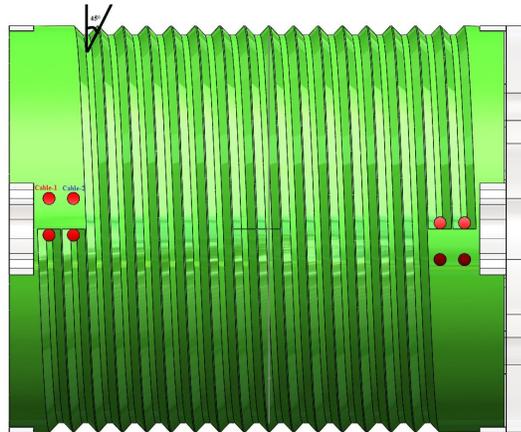
Figura 4.7: Carrete y eje roscado



Fuente: Autor

En la Fig. 4.8, podemos ver que al momento de su diseño se debe tener en cuenta dos parámetros que son el radio mínimo del cable y el paso del tornillo de potencia. Por ello, el bombo se ha diseñado de un diámetro de 66.5mm y con una profundidad en sus ranuras de 0.35mm con un ángulo de 45° que facilita la velocidad de impresión y un desplazamiento mas limpio que no causa fricción. Estas pieza están impresas en PLA.

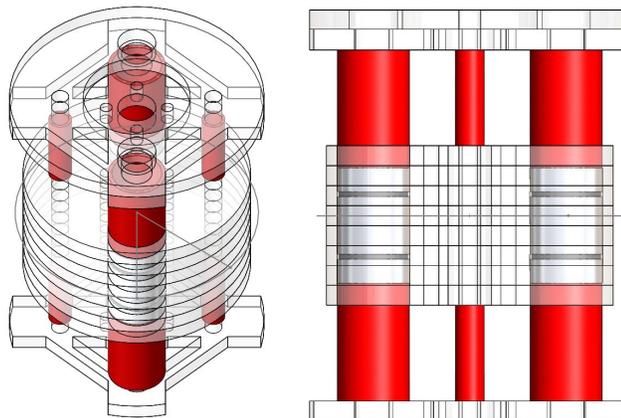
Figura 4.8: Croquis simplificado del carrete



Fuente:Autor

El bombo, además, constara de un relleno con capas de MDF, el cual sostendrán dos bujes roscados con el mismo paso de las ranuras que circulan el cable, además junto a dos rodamientos lineales para ejes lisos, que estarán en los extremos del bombo, este conjunto de piezas serán su punto de apoyo del mecanismo. ver Fig. 4.9.

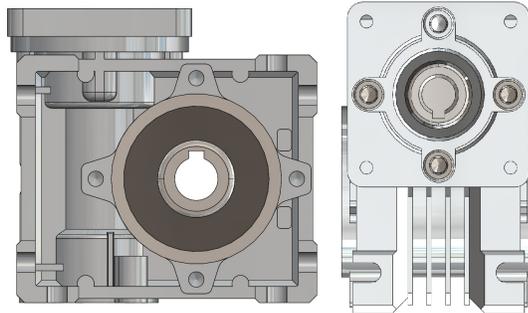
Figura 4.9: componentes del bombo y su relleno



Fuente:Autor

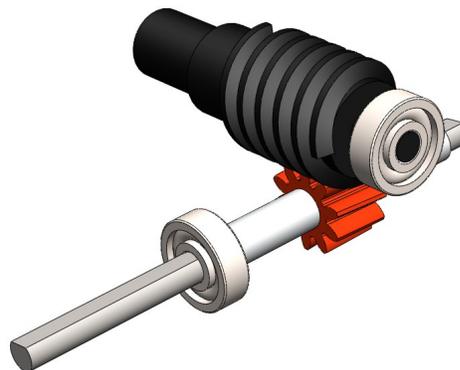
4.3.2.3. Caja reductora

Se denomina caja reductora a un mecanismo que consiste, generalmente, en un grupo de engranajes, con el que se consigue mantener la velocidad de salida en un régimen cercano al ideal y preciso para el funcionamiento del robot. En este caso la caja reductora cuenta con un tornillo sin fin el cual reduce en gran cantidad la velocidad. Tiene una relación de 10:1 desarrollada para el motor nema23 como se muestra en la Fig. 4.10.

Figura 4.10: Caja reductora NVMR30 $i=10$ 

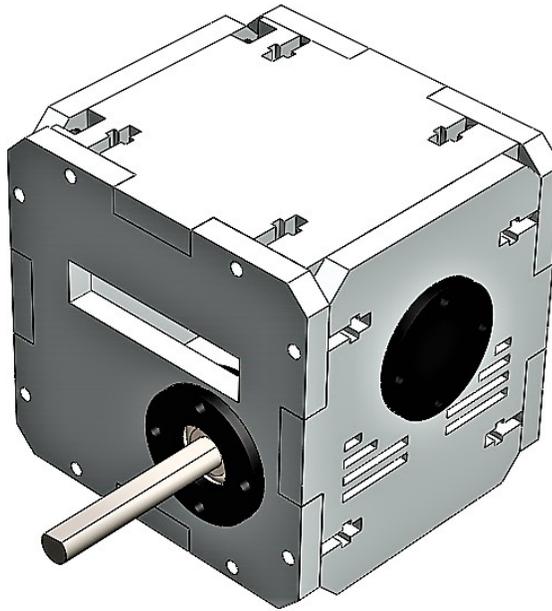
Fuente:Autor

Antes de optar a un reductor comercial con la menor reducción que cumpla con los requerimientos y funciones mas eficientes para el prototipo, se fabrico inicialmente unos reductores en impresión laser y 3D, con el propósito de tener una reducción aun menor y economizar costos en la Fig. 4.11, se muestra la Corona Sin-Fin que fue fabricada en Nylon un material resistente que tiene poco desgaste comparado con el PLA o el ABS.

Figura 4.11: Corona Sin-Fin $i=5$ en Nylon

Fuente:Autor

Con respecto a la caja se hizo en MDF un diseño ergonómico y lo mas sencillo de ensamblar que se puede observar en la Fig. 4.12 . Uno de los problemas que se encontraron es que la fuerza del motor era mayor a la resistencia que generaba la madera ya que con el uso continuo está cedía perdiendo estabilidad a la caja por lo que opto a cambiar el reductor por uno comercial, ya que la Universidad de Ibagué no cuenta aun con los elementos necesarios para una fabricación en acero.

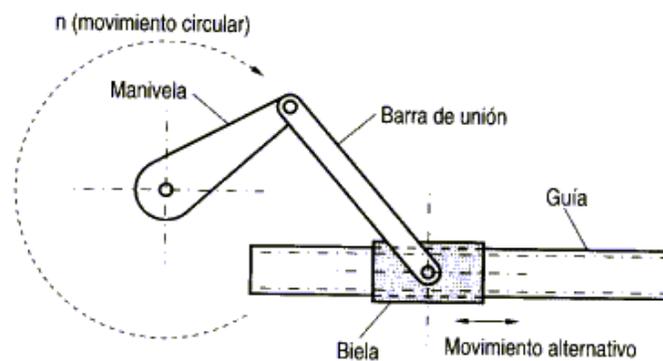
Figura 4.12: Caja reductora $i=5$ 

Fuente:Autor

Los cálculos que se realizaron de la caja fueron manejados por *Matlab*

4.3.2.4. Mecanismo de transferencia de movimiento del bombo

Figura 4.13: Croquis simplificado de un mecanismo biela-manivela

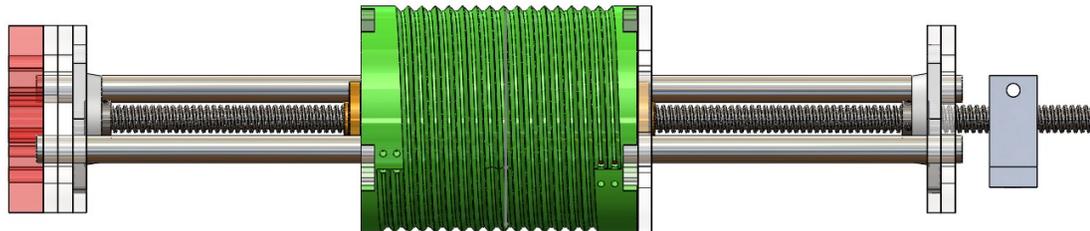


Fuente:Autor

El mecanismo que se desarrolla para la transferencia de su movimiento es llamado biela – manivela como se puede observar en la Fig. 4.13, que sería la traslación, a la vez rotación del tornillo de potencia hacia el bombo. Por ello se pretendió que el bombo sostenga dos bujes roscados que compensaran su centro de masa, además que dará su rotación y traslación, dos ejes lisos en cada extremo que son la guía para que el sistema no se pandee o tenga vibraciones, y una caja reductora

que nos va a dar el freno del sistema, ganando precisión en el momento que el cambio de posición en un plano espacial (coordenadas X,Y,Z).

Figura 4.14: Mecanismo de transferencia de movimiento del bombo



Fuente: Autor

Hablando un poco más de su fabricación como se muestra en la Fig. 4.14, se realizó dos soportes que sostendrán los elementos de sujeción del tornillo de potencia y el acople de los ejes lisos. Estos ejes fueron sacados de impresoras dañadas, se realizó procesos en el torno para disminuir su tamaño al que se necesita en la aplicación y 4 aros superficiales para el acople de pines, esto nos permite que los ejes no se salgan por la fuerza que ejerce el mecanismo, además de asegurar que se encuentre fijo para que el bombo tenga un mejor deslizamiento. Para asegurar un movimiento pulido, dentro del bombo se adicionaron 2 rodamientos lineales para una traslación más precisa a la hora de su funcionamiento.

4.3.2.5. Plataforma del sistema recolector

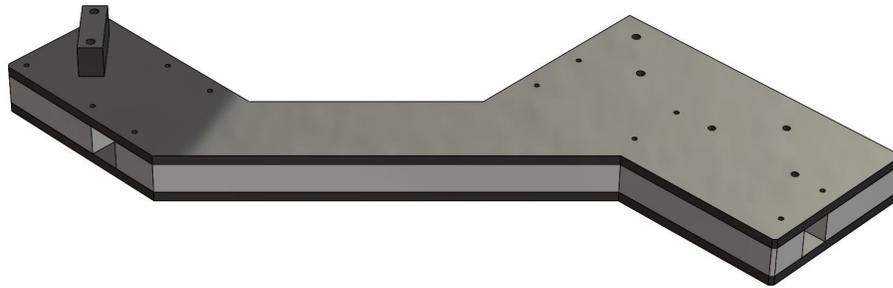
La plataforma se hizo basado en la modulación reticular de espacios como la uniones del marco del robot, que permitan optimizar el tiempo de construcción y debido a que son transportables, desmontables y reorganizables, así impulsar múltiples funcionalidades y su reutilización al generar un nuevo uso diferente al que fueron fabricados.

Un sistema modular se puede caracterizar por los siguientes párrafos:

- Partición funcional en discretas módulos escalables y reutilizables que consiste en aislados, autónomos elementos funcionales
- Uso riguroso de interfaces modulares bien definidas, incluyendo descripciones orientado a objetos de la función del módulo.
- Facilidad de cambio lograr transparencia tecnología y, a la medida de lo posible, hacer uso de estándares industriales para interfaces clave

Además de la reducción en los costos (debido a una menor personalización, y menos tiempo de aprendizaje), y la flexibilidad en el diseño, la modularidad ofrece otros beneficios como al incrementar (la adición de una nueva solución con sólo conectar un nuevo módulo), y la exclusión.

Figura 4.15: Plataforma del mecanismo de recolección



Fuente: Autor

En la Fig. 4.15, su fabricación fue por medio de capas en MDF, para que al momento de unir las se adhiera y compacten en los perfiles de aluminio ayudándole a dar rigidez y estabilidad a la estructura además de sostener todo el mecanismo de recolección.

4.3.3. Sistema de poleas

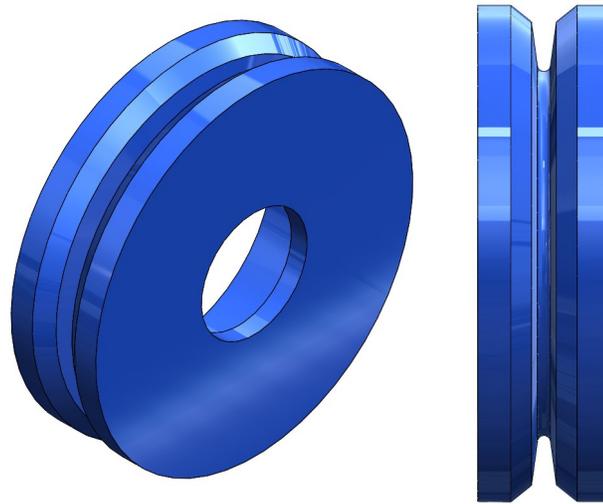
El diseño del sistema de poleas es fundamental, por que es el mecanismo que permitirá guiar los cables al efector 3D y mantener los dos cables siempre en paralelo, como también asegurar que cuyo cable a la salida del bombo no tenga movimientos bruscos. Una ventaja, con respecto a algunos robots convencionales, es llevar un mecanismo de poleas independiente, es decir, estos mecanismos consiguen que el motor no se convierta en un sistema móvil a la hora de guiar el cable, que llevaría a vibraciones innecesarias y una pérdida de precisión importante.

4.3.3.1. Poleas

Se han diseñado dos poleas fabricadas por impresión 3D con material en plástico PLA, su función como se explico anteriormente son una guía del cable hacia el efector 3D y están separadas entre ellas en distancias iguales a la altura del sistema de poleas del efector 3D. Esto se hace con el propósito de mantener el paralelismo entre los cables, una de las características que se fijo como objetivo de este proyecto.

Como se puede notar en la Fig. 4.16, para garantizar que el cable empuje las poleas, su ranura es profunda, teniendo así un agarre mayor en el cable y este no se salga del sistema, además tiene en su interior rodamiento radial para facilitar su giro evitando fricción en el sistema.

Figura 4.16: Poleas del robot

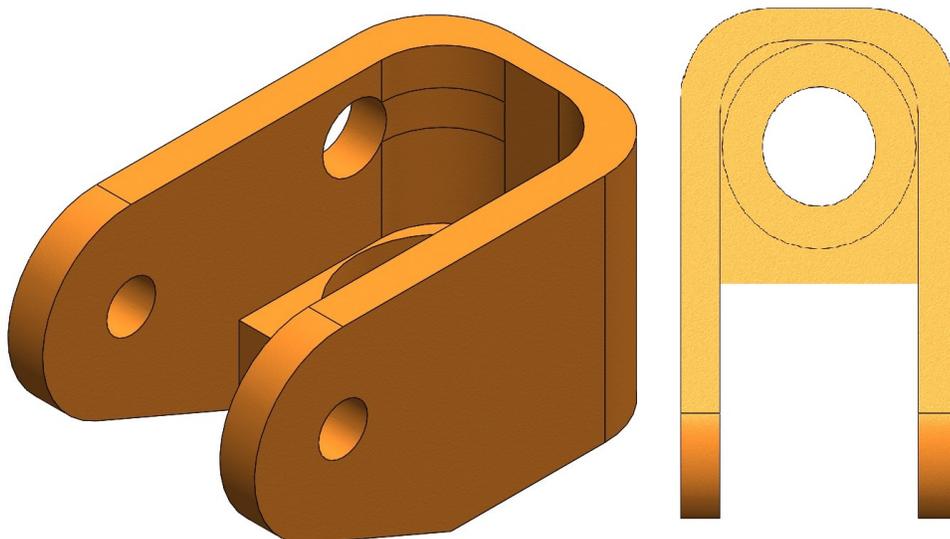


Fuente:Autor

4.3.3.2. Cuerpo del mecanismo

Su estructura es ergonómica, modular y con alta estabilidad. Se compone de dos soportes en los extremos del sistema de poleas, fabricados en PLA, en donde va estar fijo un rodamiento línea permitiendo el giro del mecanismo, y estarán sujetas las poleas por dos laminas en acrílico en sus lados en el que la Fig. ?? se puede notar,

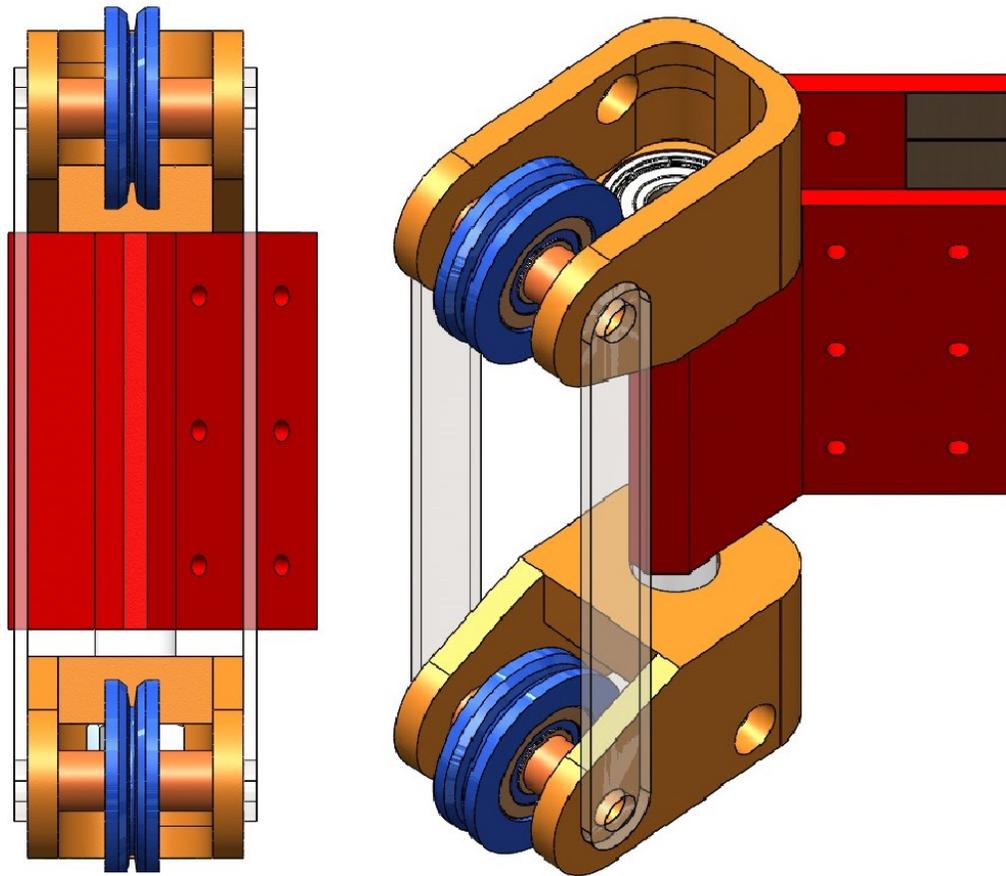
Figura 4.17: Soporte poleas giratorias



Fuente:Autor

En el medio va estar el separador del sistema de poleas, el cual su función es estar sujeta en el chasis el prototipo y abarcar la distancia entre cables como se observa en la Fig. 4.18.

Figura 4.18: Sistema de poleas



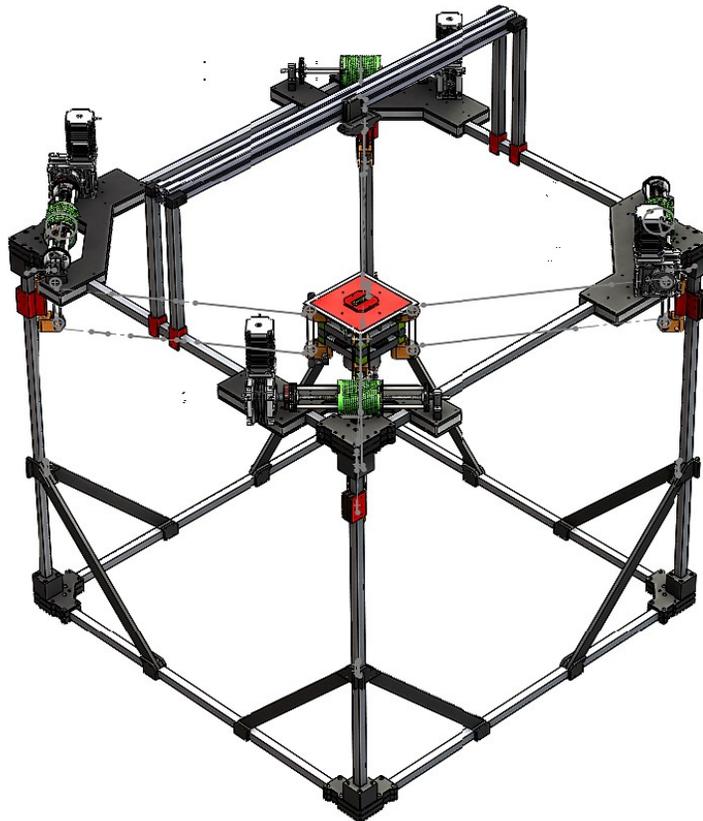
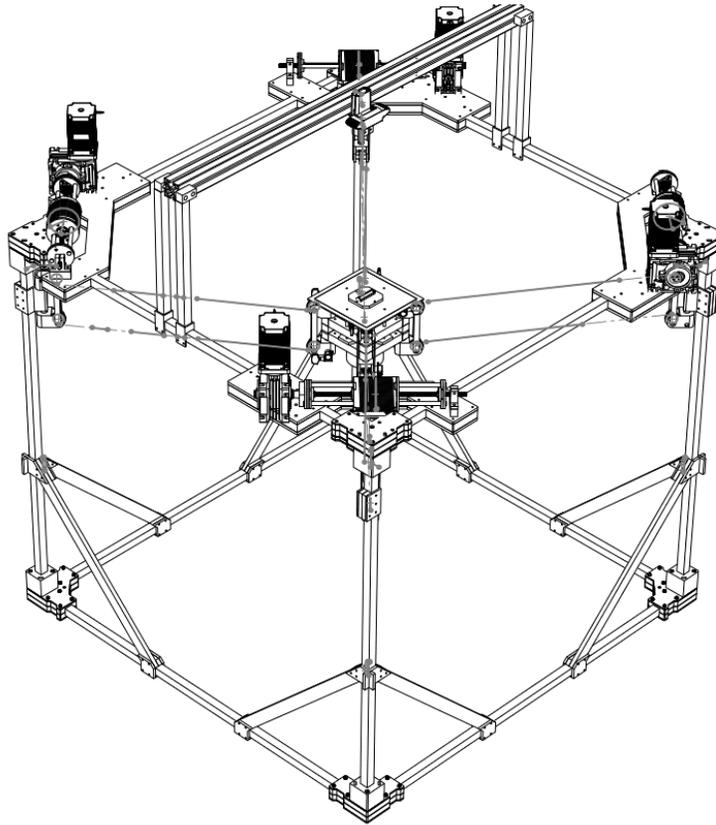
Fuente: Autor

Por último se debe recalcar que el mecanismo en sus extremos está sujeto con un perno ganando rigidez, evitando el pivoteo y que el mecanismo bajo vibraciones y esfuerzos no rote manteniéndose estable en cada posición.

4.3.3.3. Sujeción al chasis

El ensamblaje del chasis del robot junto al sistema recolector, sistema de polea y efector 3D, se utilizó la unión que va ensamblada en la parte superior de las esquinas del chasis y la pequeña base explicada anteriormente que va adherida solamente en los perfiles diagonales. Para su acople fijo de la estructura se utilizaron los tornillería M3 en todas las piezas Fig. 4.19.

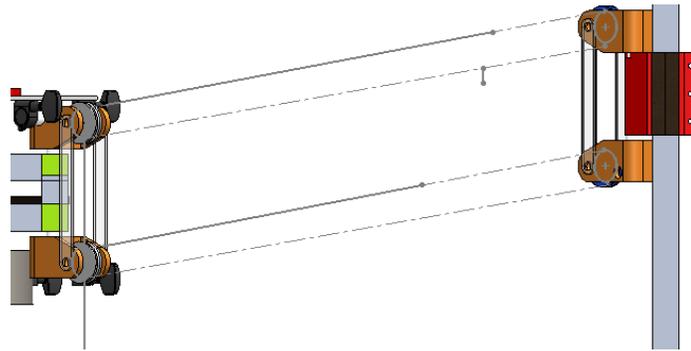
Figura 4.19: Ensamblaje completo del RPCC espacial



Fuente: Autor

Algo en tener en cuenta es que el sistema de poleas del efector final, debe tener la misma distancia del sistema de poleas del prototipo d_o , ya que deben conservarse entre las cuerdas una posición en paralelo d_p como se puede observar en la Fig. 4.20.

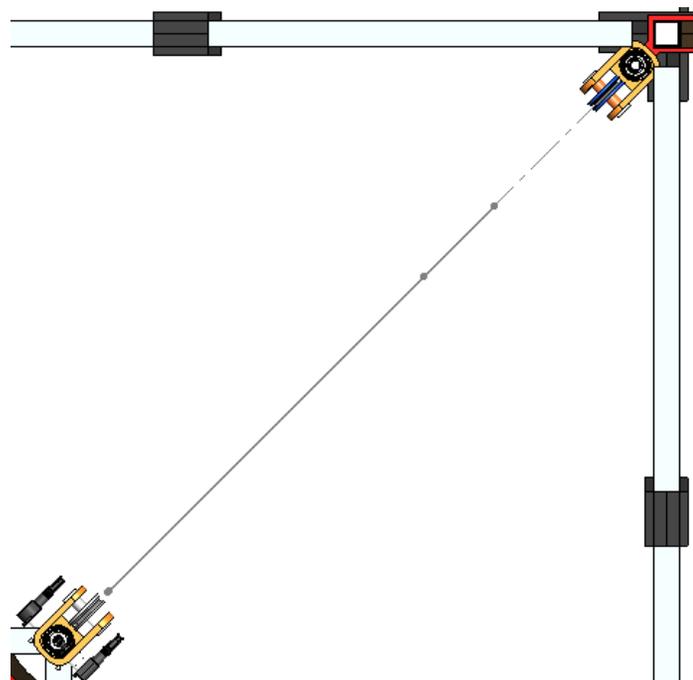
Figura 4.20: Esquema del sistema de poleas del efector final y prototipo



Fuente:Autor

En la Fig. 4.21, se asegura que los dos sistemas se encuentren totalmente perpendiculares al recolector, y que de él salga la longitud del cable tangencial L_t hacia las poleas, permitiendo que el home se mantenga estable, es decir, que no pierda su posición al estar en funcionamiento.

Figura 4.21: Esquema del sistema de poleas vista superior



Fuente:Autor

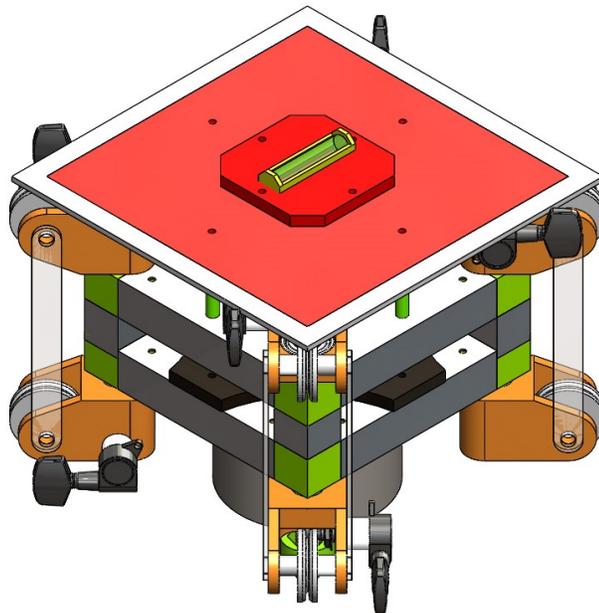
4.3.4. Efecto-Final

Un efecto final puede ser visto como parte del robot que interactúa con el ambiente de trabajo en el que fue diseñado. En un sentido más amplio, el efecto final podrían ser cualquier cuerpo o máquinas de herramientas, como un taladro o cortador de fresado, un brazo robótico, un patrón de cables que se cierra como el diafragma de una cámara, alrededor de un mango u otro punto de agarre.

- **Impactive:** mandíbulas o garras que físicamente pueden captar por el impacto directo sobre el objeto
- **Ingressive:** alfileres, agujas o pelos de punta, que físicamente pueden penetrar en la superficie del objeto, se utiliza en la industria textil, el carbón y el manejo de la fibra de vidrio
- **Astrictive:** las fuerzas de succión aplicada a la superficie de los objetos, ya sea por vacío, magneto-o electroadhesion
- **Contigutive:** que requieren el contacto directo de la adhesión como el pegamento, tensión superficial o congelación

Para las pruebas experimentales del RPCC prototipo, se hizo el diseño y construcción de un efecto final lo que nos va a permitir de hacer ciertas simulaciones y trayectorias guiadas por el estudiante Julian Ernesto Taborda Almanza, para observar el funcionamiento y comportamiento de este. Para ello se mostrara en este capítulo los parámetros de diseño que se tuvieron en cuenta para su construcción vea la Fig. 4.22 y Fig. 4.23 , mostrando el efecto final terminado en programa CAD y ensamblado en el prototipo.

Figura 4.22: Efecto Final en programa CAD



Fuente: Autor

Figura 4.23: Efector Final Construido

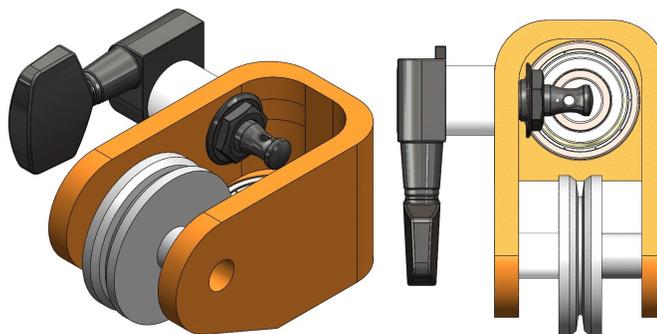


Fuente: Autor

4.3.4.1. Sistema de poleas

Para el sistema de poleas se usó el mismo diseño al prototipo, lo que difiere de estos dos modelos como se puede observar en la Fig. 4.24, es que el del efector final cuenta con un mecanismo de tensión de cables. Se utilizaron clavijas de guitarra acústica. Las clavijas sirven para tensar o destensar las cuerdas en función del sonido que queremos emitir. El objetivo es igual tensar o destensar los cables para trasladar el efector a la dirección que queremos que se mueva.

Figura 4.24: Soporte sistema de poleas efector final



Fuente: Autor

Funcionan de una forma similar a la de un tornillo, todo dependiendo de hacia qué lado estaríamos girando las clavijas que es como apretar o aflojar las cuerdas de una guitarra en realidad para que nos hagamos una pequeña idea. Por su parte, el clavijero del instrumento es la parte que encontramos más arriba y es dónde tenemos situadas estas pequeñas piezas tan importantes para tocar véase la Fig. 4.25, la clavija que se utilizó para el diseño.

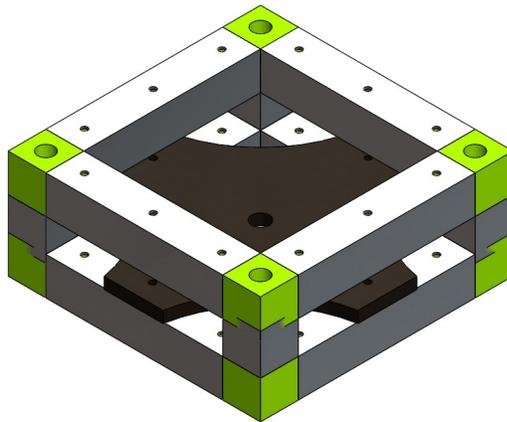
Figura 4.25: Clavija de guitarra



Fuente: Autor

4.3.4.2. estructura mecánica del efector final

Figura 4.26: Chasis del efector final



Fuente: Autor

En la Fig. 4.26, se observa la estructura fija del efector final, en la que se va ensamblar el sistema de poleas e instalar el peso que va estar soportando el prototipo, en cuanto al diseño es sencillo se pensó hacer un rectángulo con tubos de aluminio unido con impresión 3D a presión.

4.4. Simulaciones del prototipo

En el sistema recolector va estar actuando el torque del motor o par motor, es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia o, dicho de otro modo, la tendencia de una fuerza para girar un objeto alrededor de un eje, punto de apoyo, o de pivote. Esta fuerza que genera el motor paso a paso (PaP), es el que va permitir la tensión en los cables para el desplazamiento del efector final generando deformaciones en ciertos componentes del prototipo por lo que se optó a

usar simulación de esfuerzo y tensiones en un programa CAD, para saber como se compartan dichos componentes.

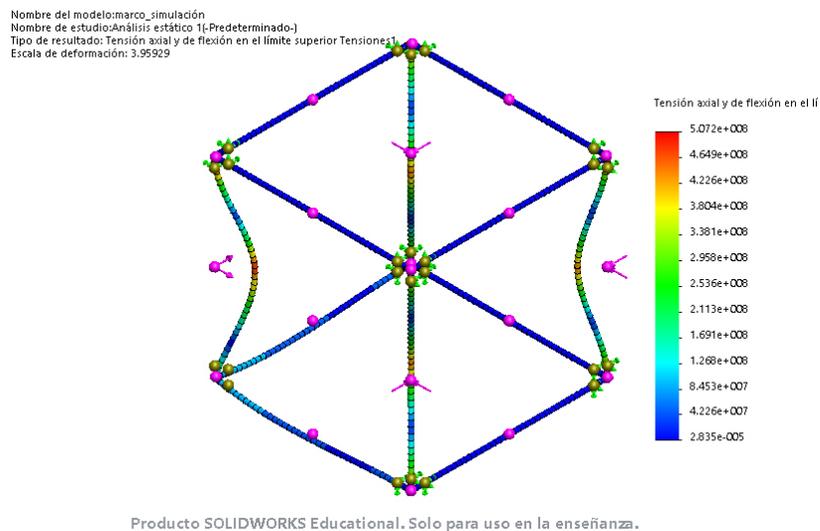
Los programas CAD le ofrecen a sus usuarios, una gran variedad de beneficios en el proceso de programación. Uno de los beneficios más importantes y que ha avanzado más en los últimos 10 años, es la capacidad de los programas CAD de simular el proyecto de mecanizado, previo a ejecutarlo en la máquina. El poder simular en un sistema CAD, es vital para eliminar posibles errores o accidentes, que pueden resultar costosos y que representan daños a la máquina y a las herramientas. En los últimos 10 años, el desarrollo de hardware especialmente en las operaciones gráficas, ha permitido que las operaciones de simulación de hoy en día sean casi tan reales como el proceso real que se está ejecutando en la máquina.

Cabe de resaltar que el prototipo se manejara masas menores o iguales a 5Kg y no sobrepasarán a este punto, ya que el tamaño, espacio y diseño del efector final se diseño para que sostuviera tal peso.

4.4.1. Simulación de la estructura

En la Fig. 4.27, se simula el prototipo soportando el peso máximo que pueden soportar los motores PaP que es de 3749.77N, el comportamiento que muestra, es que sus columnas van a estar flexionado hacia el interior de la estructura ya que la capacidad de peso que soportan los 4 perfiles de aluminio es de 1756.97N, pero como se mencionaba anteriormente, la masa que se va trabajar en el prototipo va ser de 5Kg, dando un peso de 49.05N en el que se encuentra bajo el rango que puede soportar estos perfiles.

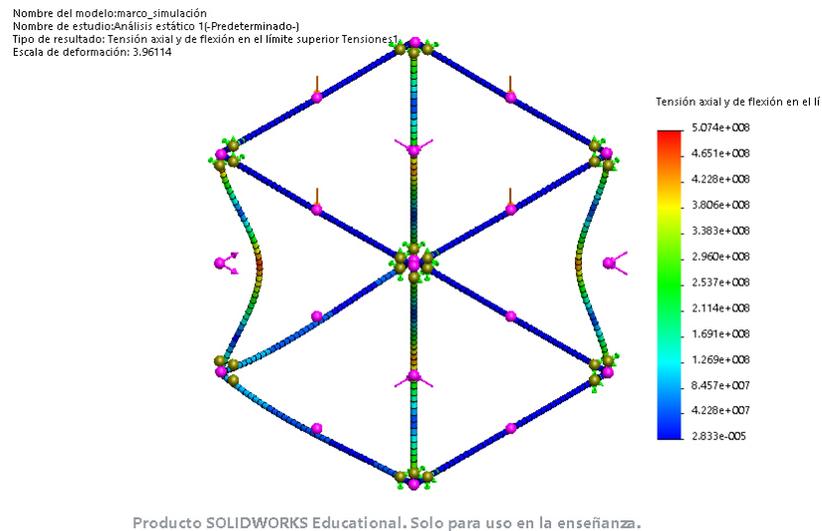
Figura 4.27: Simulación de la estructura del prototipo en las columnas



Fuente:Autor

Por otra parte en las filas de la parte superior del prototipo están soportando un peso de 29.43N, que es donde sostendrá el sistema recolector. Podemos considerar este peso despreciable ya que es mínimo bajo las cargar que puede soportar cada perfil es de 179.1 N, de igual forma se realizo el análisis para saber como se comporta el perfil bajo este peso y de que forma se empieza a flexionar, véase la Fig. 4.28.

Figura 4.28: Simulación de la estructura del prototipo en las filas y columnas

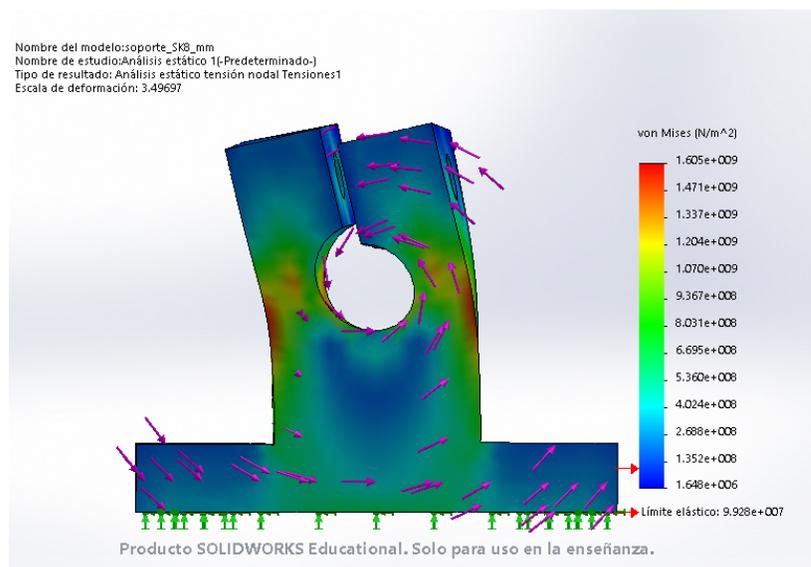


Fuente:Autor

4.4.2. Simulación Sistema Recolector

En todo el sistema recolector se va estar generando torsión de 30 Nm, pero aquella fuerza lo que ayuda a tomar movimiento rotatorio al sistema, los componentes que están fijos son los que están sufriendo de esfuerzo y tensión en el sistema en esta caso el soporte base SK8, el que va sostener el tornillo de potencia Fig. 4.29.

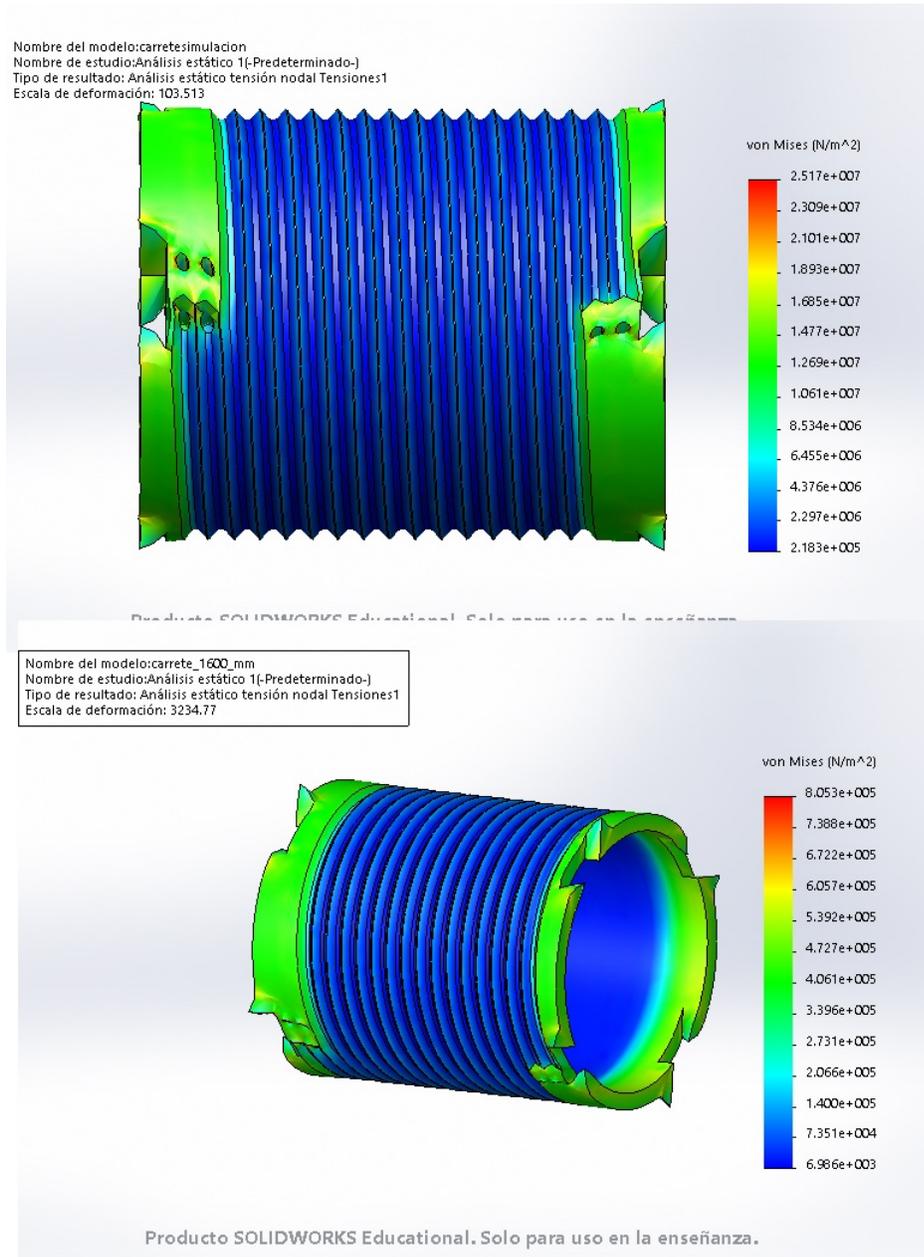
Figura 4.29: Simulación Soporte SK8 del sistema recolector



Fuente:Autor

En cuanto al carrete el daño que puede generar es mínimo ya que el va acorde al movimiento rotacional del motor, en la Fig. 4.30. se puede notar que sus pestañas son las mas afectadas intentando romper sus extremos.

Figura 4.30: Simulación del bombo

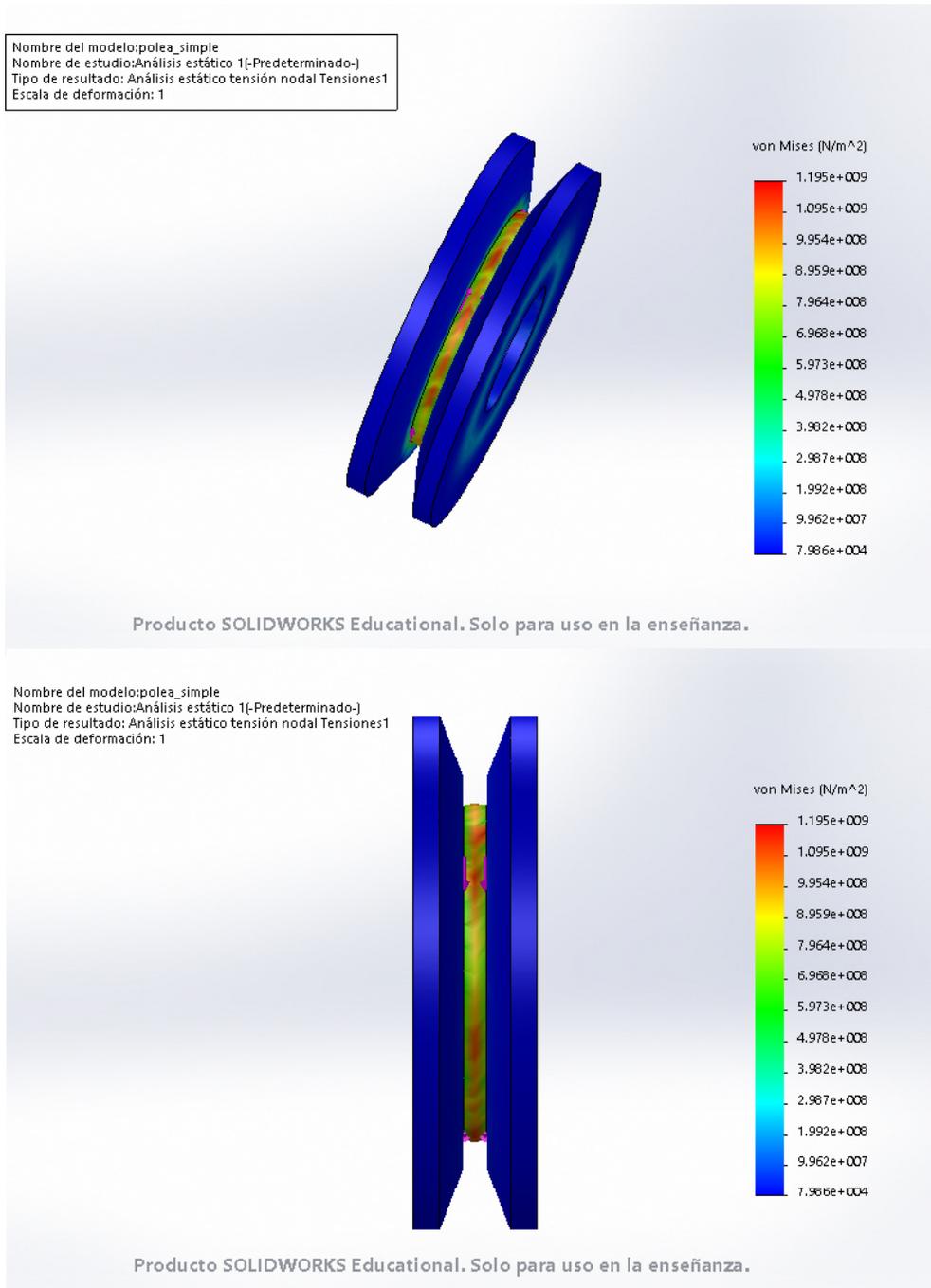


Fuente: Autor

4.4.3. Simulación sistema de poleas

En la Fig. 4.31, se analiza la torsión que transmite el carrete hacia las poleas se divide dando un valor de 15 Nm esta torsión como se ha dicho es mínima y no causa una deformación alta al sistema de poleas.

Figura 4.31: Simulación en las poleas

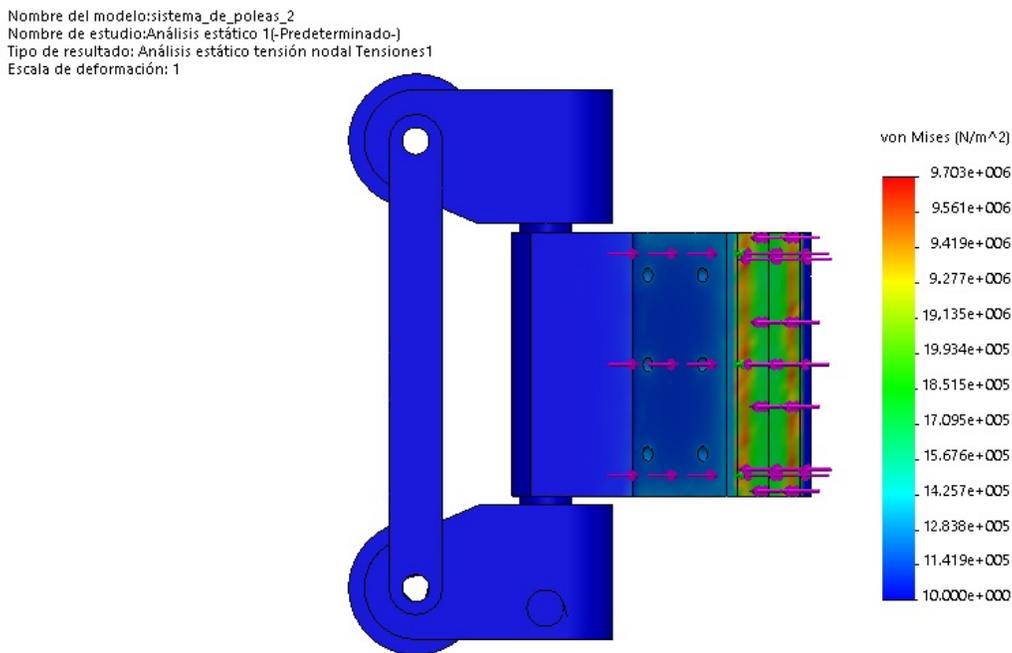


Fuente:Autor

Los esfuerzos y tensiones que se generan en los soportes del sistema de poleas son mayores causando deformación en el PLA y fatiga en el MDF, esto puede generar descalibración en sistema de tensión en los cables. En la Fig. 4.32, se encuentra los esfuerzos y tensiones con el peso máximo de 937.5N que puede trabajar los motores PaP generando una presión de $97MNm^2$ en el sistema. En los cables se va estar generando fuerzas y tensiones. Con el peso que se va trabajar constante mente en el prototipo de 49.05N genera una presión de $7.2MNm^2$, véase la Fig. 4.33.

Teniendo en cuenta el limite de resistencia del PLA es de $30MNm^2$ y el MDF $299MNm^2$ es que con las condiciones máximas de peso el soporte tiene va a fracturar no resiste tal condición de peso, en cambio al MDF lo que va sufrir es fatiga con el tiempo va ceder permitiendo un deslizamiento en el soporte. Bajo las condiciones de trabajo no va tener dificultad ya que se encuentran en el rango de resistencia del material.

Figura 4.32: Simulación del sistema de poleas con peso máximo

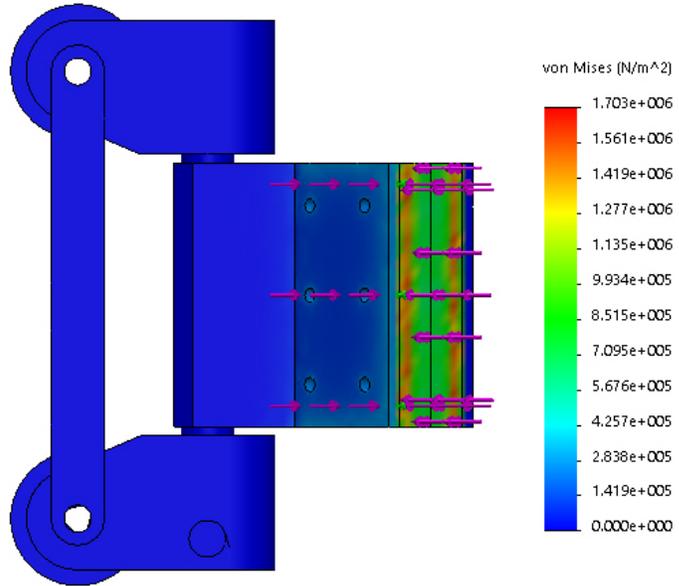


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Fuente:Autor

Figura 4.33: Simulación sistema de poleas peso experimental = 5Kg

Nombre del modelo: sistema_de_poleas_2
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Fuente: Autor

4.5. Tablas de componentes del prototipo

Componente		Medida	Unidad	Cantidad	Material	Observaciones
Marco						
Perfiles	Tubo cuadrado	19x1500	mm	16	Aluminio	Corte con tronsadora
	Inferior	-	Unidad	4	MDF	Corte láser
Uniones	Superior	-	Unidad	4	MDF	Corte láser
	Tornillo M3	3x50	mm	64	Acero	Rosca métrica
Tornillería	Tuerca m3	3	mm	64	Acero	Rosca métrica
	Tornillo M4	3x120	mm	dieciséis	Acero	Rosca métrica
	Tuerca m4	4	mm	dieciséis	Acero	Rosca métrica
Recolector						
Soporte	Soporte tornillo de potencia	-	Unidad	4	Acero	Comercial
	Soporte eje caja reductora	-	Unidad	4	Acrílico	Corte láser
	Soporte ejes lisos y tornillo de potencia	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
	Base Soporte	-	Unidad	4	PLA	Impresión 3D
Modulo	Base del recolector	-	Unidad	4	MDF	Corte láser
Motor	Nema 23	-	Unidad	4	Acero	Comercial
Caja reductora	NVMR30	-	Unidad	4	Acero	Comercial
	Bombo	-	Unidad	4	PLA	Impresión 3D
Carrete	Soporte bombo	-	Unidad	4	MDF	Corte láser
	Tapa bombo	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
	Rodamiento lineal	8	mm	8	Acero	Comercial
	Tuerca trapezoidal	8	mm	8	Acero	Comercial
Ejes	Eje guía	271,8x8	mm	8	Acero	Corte con tronsadora
	Tornillo de potencia	300x8	mm	4	Acero	Comercial
	Pin para eje	8	mm	32	Acero	Comercial
Tornillos	Tornillo M3	3x30	mm	32	Acero	Comercial
	Tornillo M3	3x50	mm	16	Acero	Comercial
	Tuerca M3	3	mm	48	Acero	Comercial
Poleas						
Soportes	Soporte cojinete 4mm	4	mm	8	MDF	Corte láser
	Soporte cojinete 9mm	9	mm	8	MDF	Corte láser
	Soporte lateral 5,5mm	5,5	mm	8	MDF	Corte láser
	Hub soporte eje	6	mm	8	Aluminio	Comercial
Poleas	Polea	30	mm	8	PLA	Impresión 3D
	Rodamiento	5	mm	8	Acero	Comercial
Ejes	Eje polea	5	mm	8	Acero	Corte con tronsadora
	Eje superior	8	mm	4	Acero	Corte con tronsadora
	Eje inferior	8	mm	4	Acero	Corte con tronsadora
	Tornillo M3	3x10	mm	16	Acero	Comercial
Tornillos	Tornillo M3	3x25	mm	32	Acero	Comercial
	Tornillo M4	4x20	mm	16	Acero	Comercial

Tabla 4.5: Tabla-resumen de componentes

Componente		Medida	Unidad	Cantidad	Material	Observaciones
Estructura						
Laminas	Lateral	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
	Inferior	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
	Superior	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
Rodamiento	608zz	6	mm	8	Acero	Comercial
Tornillos	Tornillo M3	3x15	mm	16	Acero	Comercial
	Tornillo M3	3x10	mm	8	Acero	Comercial
	Tuercas	3	metro	24	Acero	Comercial
Sistema de Poleas						
Laminas	Lateral	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
	Inferior	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
	Superior	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
Ejes	Ejes polea	6	mm	8	Acero	Comercial
Polea	Polea	30	mm	8	PLA	Impresión 3D
Mecanismo de tensión						
Clavijas	Clavijas de guitarra acústica	-	Unidad	8	Acero	Comercial
	Soporte clavijas	-	Unidad	8	MDF	Corte láser
Tornillos	Tornillo M3	3x10	mm	8	Acero	Comercial
	Tuercas	3	mm	8	Acero	Comercial

Tabla 4.6: Tabla resumen de componentes del efector final

Capítulo 5

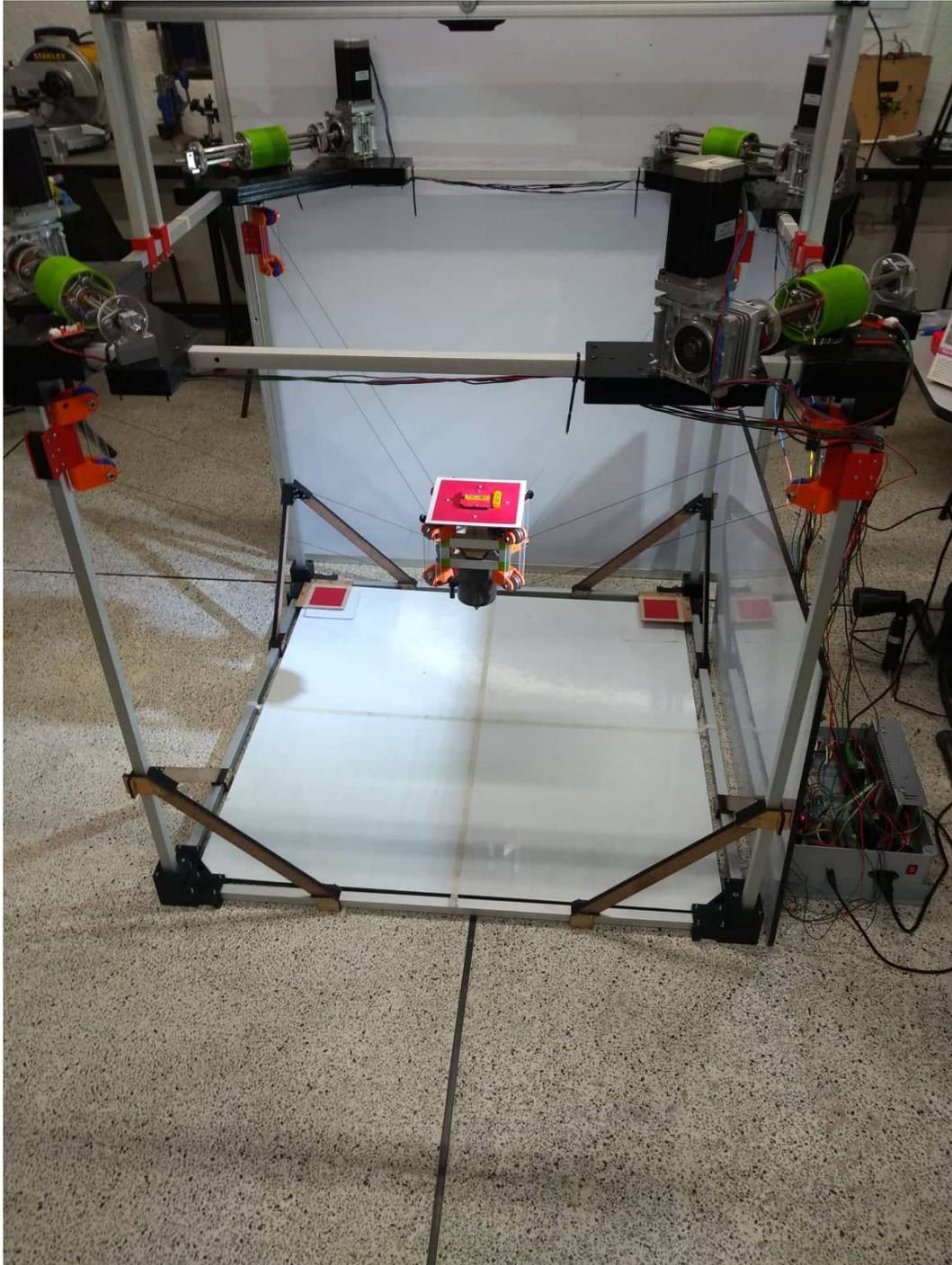
Resultados experimentales

Este capítulo se realizan pruebas y resultados experimentales se concluye los márgenes de error, mejores y modificaciones que se harán en futuras investigaciones del robot.

5.1. Pruebas y resultados experimentales con el modelo matemático

El robot construido se puede ver en la Fig. 5.1. Una vez construidas, se realizaron las trayectorias cartesianas fueron diseñadas para probar su funcionamiento.

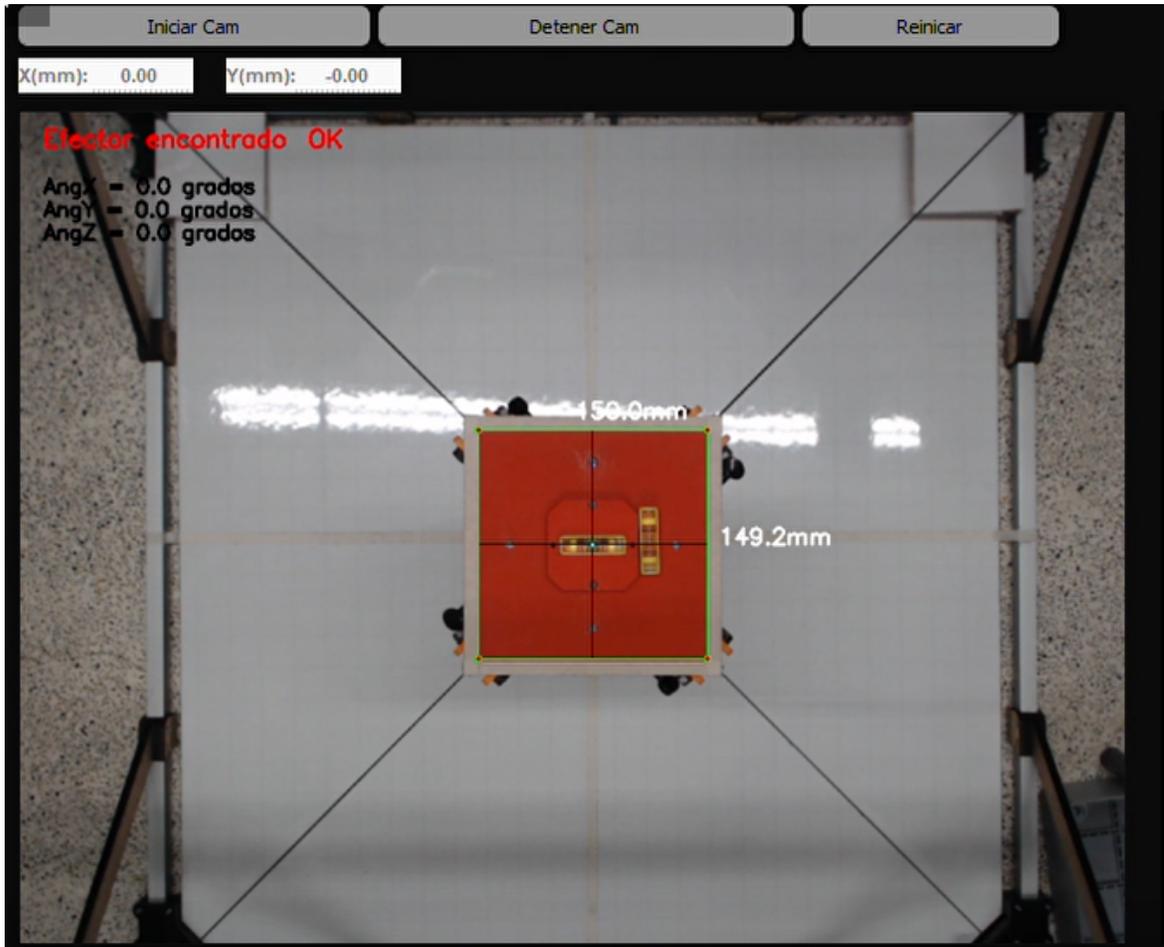
Figura 5.1: Prototipo construido



Fuente: Autor

Con el robot construido, la cinemática y las trayectorias cartesianas propuestas, en la Fig. 5.2, se realizó un vídeo de el movimiento del robot, midiendo la posición del efector final usando visión por computador, que ha demostrado ser un método adecuado y preciso.

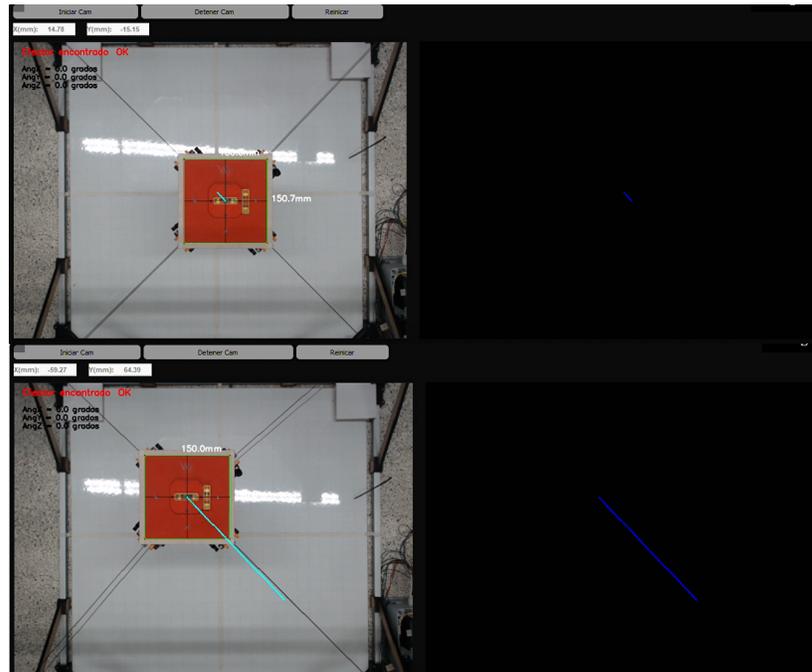
Figura 5.2: Prototipo construido



Fuente: Autor

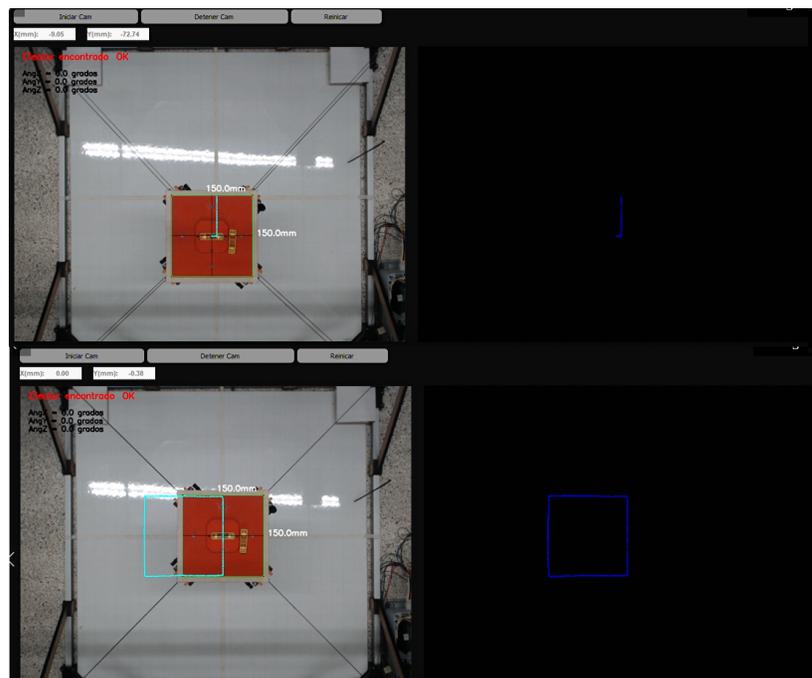
Presenta la ventaja de demostrar los efectos de ciertos parámetros como la naturaleza flexible de los cables. Simultáneamente, debido a que es una medida externa, del sistema, los desplazamientos del efector final cuadro por cuadro para determinar el movimiento real, el rendimiento del sistema de poleas conforme a los desplazamientos del robot y el espacio de trabajo que este posee. Esto, para señalar que el robot fue grabado con un 60 FPS y 1080 p. cámara. Ambos resultados (simulación y movimiento real), así como la trayectoria deseada de 4 figuras: línea, cuadrado, círculo y rombo como se muestra en la Fig. 5.3, Fig. 5.4, Fig. 5.5 y Fig. 5.6.

Figura 5.3: Prototipo construido



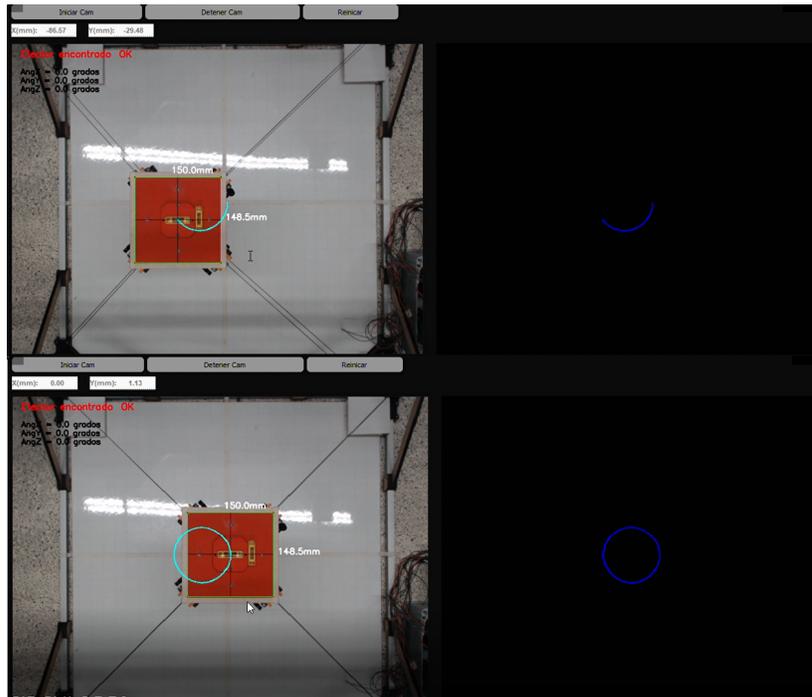
Fuente: Autor

Figura 5.4: Prototipo construido



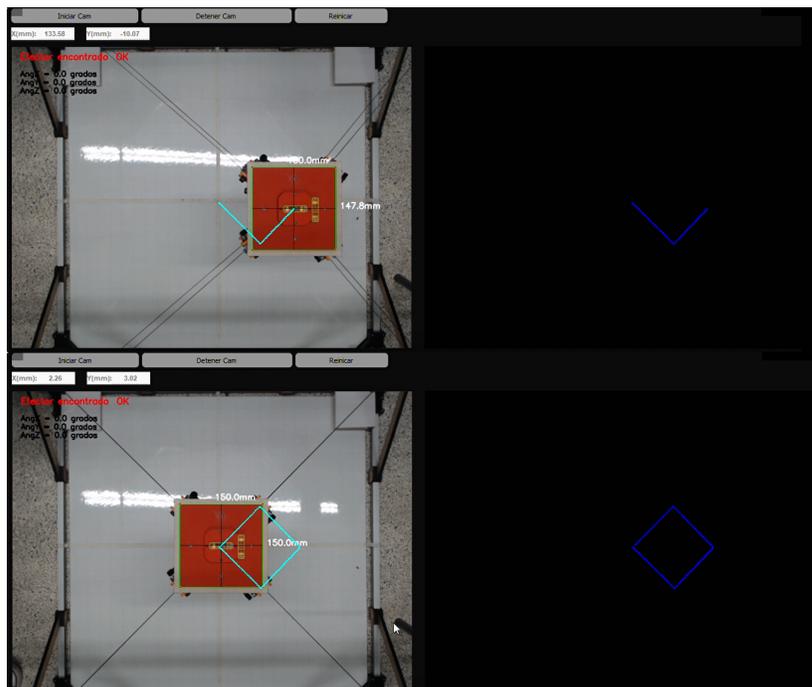
Fuente: Autor

Figura 5.5: Prototipo construido



Fuente: Autor

Figura 5.6: Prototipo construido



Fuente: Autor

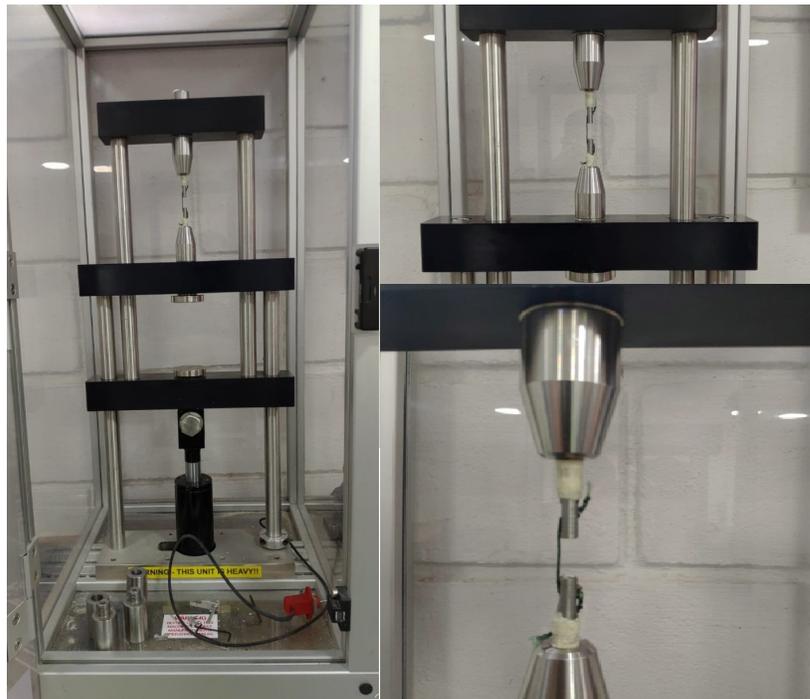
5.2. Pruebas experimentales de fuerza a la tensión y deformación

En complemento a las pruebas y resultados experimentales con el modelo matemático, se realizaron pruebas de tensión en la polea como tal y en el cable, ya que estos sera afectados por fuerza generada en los motores y la concentración de esfuerzo que genera al estar en funcionamiento el robot.

Se opto es realizar dos ensayos de tracción con normas ISO, uno para el cable y otro para la polea en donde el cable estará generando tensión por ambos extremos para observar de que si el material con una densidad de impresión del 60 % es capaz de soportar la fuerza que alcanza soportar el cable.

En la Fig. 5.7, se muestra el acople de la probeta que esta hecha en acero 1020 con la cuerda, lo que se hizo fue dividir la probeta, luego poner las caras de los extremos de la probeta planas para así poder perforarla con una broca de 1mm y el cable pudiese ajustar en él. Se prosigue a enroscar los extremos de la probeta a la maquina tomar la elongación inicial del sistema y aplicar la fuerza con intervalos de 100 en 100 N.

Figura 5.7: Ensayo de tracción en la cuerda



Fuente: Autor

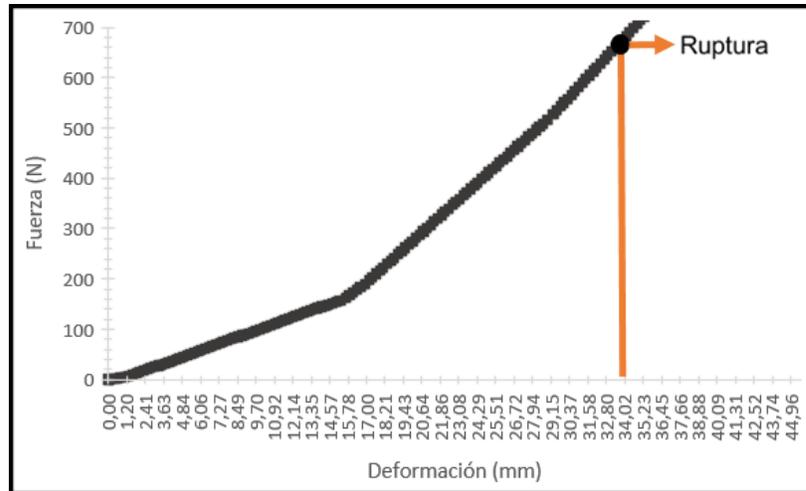
Los valores que arroja la maquina son la fuerza aplicada, la deformación unitaria y la sección de la cuerda en cada instante. Por consiguiente se halla el esfuerzo con la Ec. 5.1, siendo F la fuerza aplicada, A la sección de la cuerda y σ el esfuerzo.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Por consiguiente se tabularon los datos obtenidos en la maquina por excel, con la información recogida se llevo a una carga de $1200N$ y deformación de $29mm$ del cable cuando llega a su ruptura, Fig. 5.8.

En parte en las poleas que están fabricadas en PLA con una masa de 4.42 gramos y un porcentaje de 60% de impresión. En la Fig. 5.9 se puede observar la polea sujeta a la maquina para su respectivo ensayo, en el cual aguanto una fuerza de 700N aproximadamente 70Kg, si se mejora el porcentaje de impresión o se cambia el material de la polea soportaría mas peso. Pero como el sistema no va soportar pesos igual o superior a 5kg, el peso que soporta esta bien para el proceso. Observar la Fig. 5.10.

Figura 5.10: Diagrama esfuerzo-deformación en el cable



Fuente: Autor

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

Este capítulo presentan las conclusiones alcanzadas en el proyecto de investigación, y se enumeran algunos trabajos futuros para la continuación del trabajo realizado en el semillero *Mecaufonica*.

6.1. Conclusiones

Los objetivos marcados en la introducción del trabajo se han llevado a cabo de manera satisfactoria. Se realizó un estudio del estado del arte de los robots con cables tipo planar y espacial, detallando características como: morfologías, tipos de materiales y componentes mecánicos de los robots.

Así mismo, para el paso previo al diseño del RPCC, se ha partido de un modelo cartesiano convencional para dejar claro cuál es el aspecto que se quiere para el robot, en cuanto a las uniones de MDF, estructura, motores, etc. También se ha hallado un espacio de trabajo que permita hacer ensayos de manera cómoda con margen de movimiento, considerando esto como una mejora significativa en cuanto al prototipo de La Universidad Castilla-La Mancha anteriormente expuesto, que sirvió como inspiración para el desarrollo de la actual asistencia de investigación.

El análisis estático del sistema nos ha permitido hallar dicho espacio de trabajo y gracias al programa Matlab lo hemos podido representar gráficamente para tener como referencia el espacio de movimiento que puede tener el efector final experimentalmente, obteniendo resultados de espacios de trabajo óptimos del 74 % en el prototipo planar y 55 % en el espacial.

Se diseñó un modelo 3D utilizando Solidworks, lo cual permitió el análisis de interferencias entre los diferentes elementos del sistema para su posterior construcción, junto con análisis estáticos en el sistema de poleas, en el sistema recolector de cables y en el bastidor con cargas críticas. Se utilizó la Toolbox para el uso de piezas comerciales como: rodamiento, tornillos y tuercas. Finalmente se generaron los planos en detalle de cada una de las piezas y ensamblajes del robot. En definitiva, se ha obtenido un robot con un peso reducido relativamente a su tamaño.

El estudio de tensión realizado al cable da certeza de la información proporcionada por el fabricante que indica una resistencia máxima de 125 kg antes de la fractura. De igual forma las poleas impresas pueden soportar cargas hasta 60 kg con una densidad de impresión del 60 %.

Las pruebas experimentales realizadas al robot demuestran un correcto funcionamiento del mismo para movimientos de su efector final en los 3 ejes coordenados.

6.2. Trabajos futuros

un futuro proyecto hay que tener en cuenta dos aspectos. Primero, los detalles a mejorar con respecto a este diseño y segundo, aplicar el robot a una aplicación concreta dependiendo de sus características.

Para mejorar los detalles de este diseño habría que tener en cuenta algunos factores en cuanto al funcionamiento del recolector, para mejorar aun mas su estabilidad. Por otro lado, realizar consideración en el caso de las poleas que guían el cable al efector 3D, como mejorar su diseño y acople, para así evitar los movimientos inestables en los cables.

Para futuros trabajos, como ya se indicó en la introducción, una posible aplicación puede ser la de añadir un extrusor en el efector 3D y que este robot funcione como impresora 3D donde añadiendo la electrónica necesaria se programe el movimiento mediante la cinemática hallada y permita a este robot trabajar en las condiciones requeridas como son las de temperaturas relativamente altas.

Otras posibles aplicaciones puede ser la de utilizar este robot como herramienta de medición. Aunque sería más complicado debido a que se tendría que rediseñar por completo para que se adaptase a las condiciones de disminución de vibraciones.

Referencias y Bibliografía

- [1] ALVAREZ, N. X. G. *Desarrollo de un entorno de simulación para un robot paralelo activado por ocho cables*. PhD thesis, Universidad Politécnica Salesiana (Cuenca, Ecuador), 2017.
- [2] AUTOMATISMES, E. Cable robot for lifting assistance and 2d/3d positioning @ONLINE.
- [3] CRESPO, A. B. *Demostración de mejora cinemática para el posicionamiento de robots comandados mediante cables*. PhD thesis, UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA (La Mancha, España), Julio 2015.
- [4] ELECTRONILAB. Driver microstepper motor paso a paso – tb6600 – 0.5-4a 12-40vdc @ONLINE.
- [5] ELECTRONILAB. Shield ramps 1.4 para impresora 3d reprop prusa mendel @ONLINE.
- [6] ESPESCA. Hilos y líneas de pesca. @ONLINE.
- [7] MASLOW. Maslow es un proyecto de código abierto impulsado por la comunidad con el objetivo de hacer que la tecnología cnc de gran formato esté disponible para todos. creemos en un mundo donde las personas de todo el mundo puedan colaborar, compartir y construir cosas increíbles juntas. @ONLINE.
- [8] OTTAVIANO, E. Analysis and design of a four-cable-driven parallel manipulator for planar and spatial tasks. *SAGE* 222 (2008), 1583–1592.
- [9] SKYCAM. Skycam nació gracias al liderazgo y creatividad de sus fundadores claudio valde-rrama y diego ugarte a inicios del 2013 para crear nuevas herramientas de venta en el sector inmobiliario. @ONLINE.
- [10] TECNALIA. Un nuevo concepto para la fabrica del futuro @ONLINE, 2015.
- [11] Y SUNIL K. AGRAWAL, J. D. Dynamic modeling of cable-driven parallel manipulators with distributed mass flexible cables. *Journal of Vibration and Acoustics* 137 (2015), –.

Anexos

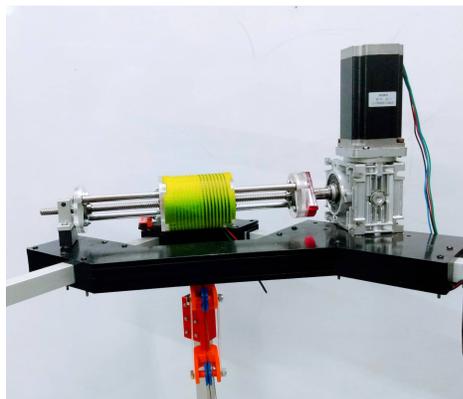
Imágenes del prototipo

Figura 6.1: Pie de amigo del prototipo



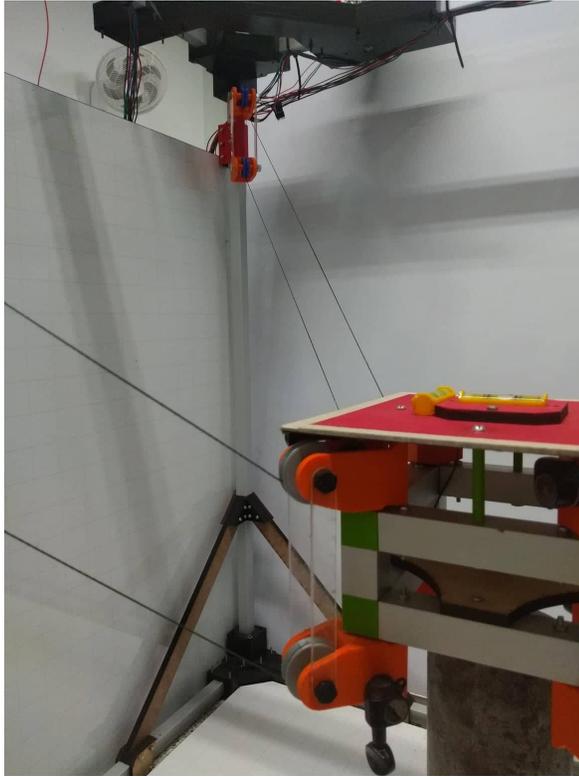
Fuente:Autor

Figura 6.2: Sistema recolector



Fuente:Autor

Figura 6.3: Sistema de poleas puesta en marcha



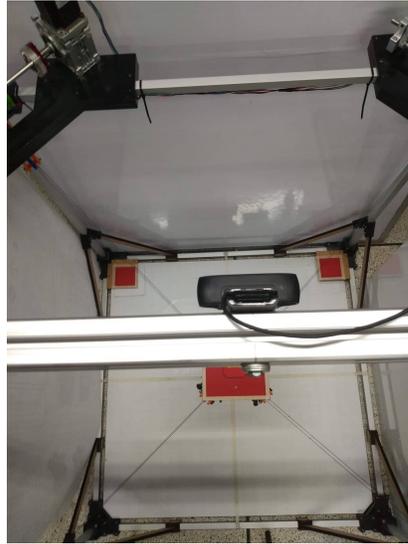
Fuente: Autor

Figura 6.4: Efecter final vista superior



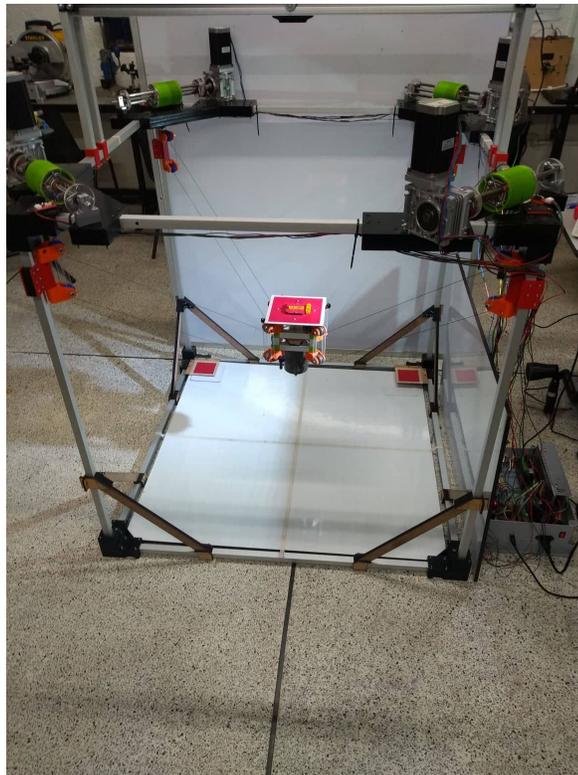
Fuente: Autor

Figura 6.5: Prototipo vista superior



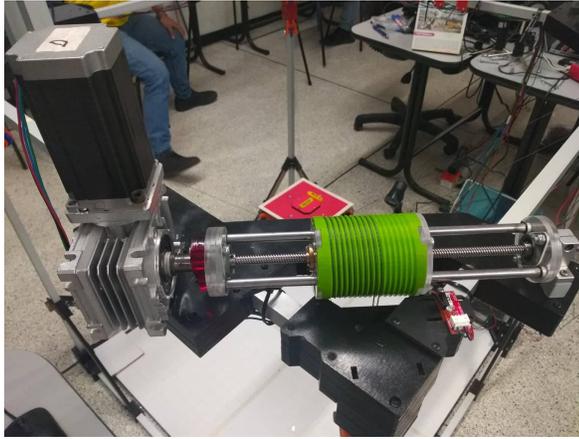
Fuente: Autor

Figura 6.6: Prototipo construido



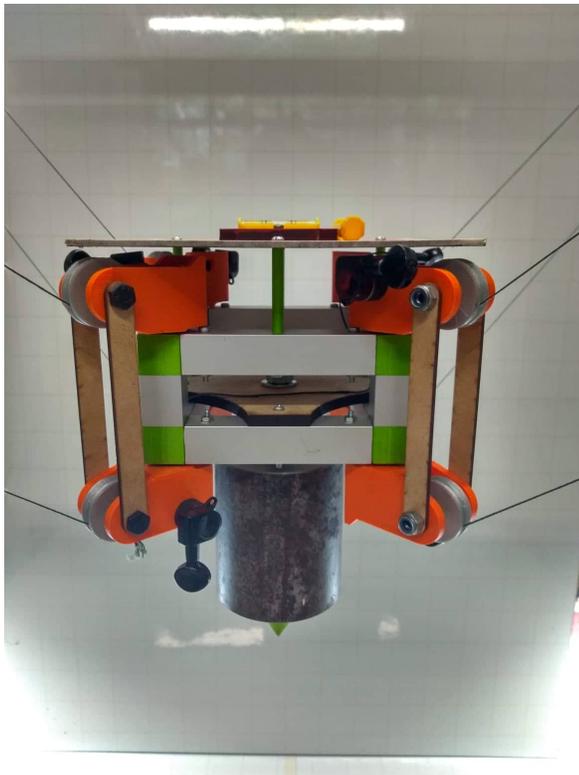
Fuente: Autor

Figura 6.7: Sistema de poleas vista isométrica



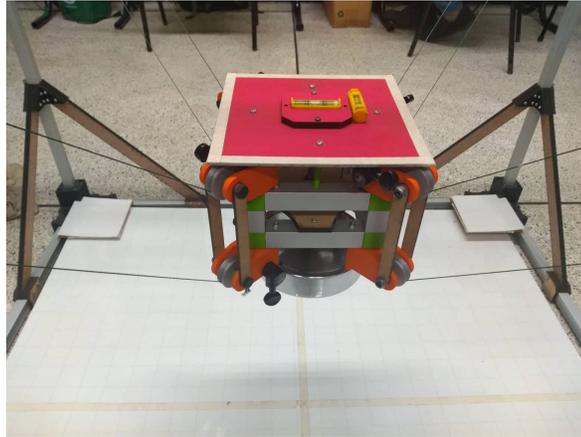
Fuente: Autor

Figura 6.8: Efecto final vista frontal



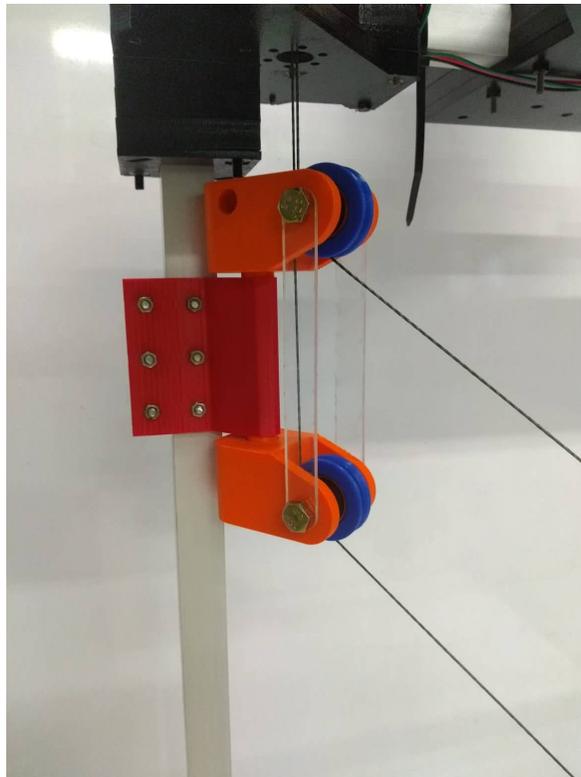
Fuente: Autor

Figura 6.9: Efecto final vista isométrica



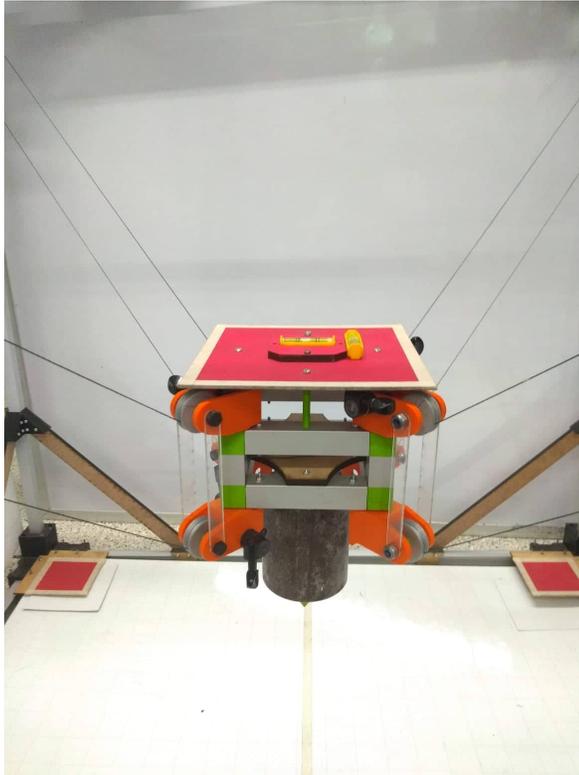
Fuente: Autor

Figura 6.10: Sistema de poleas



Fuente: Autor

Figura 6.11: Efecto final vista dimétrica



Fuente: Autor

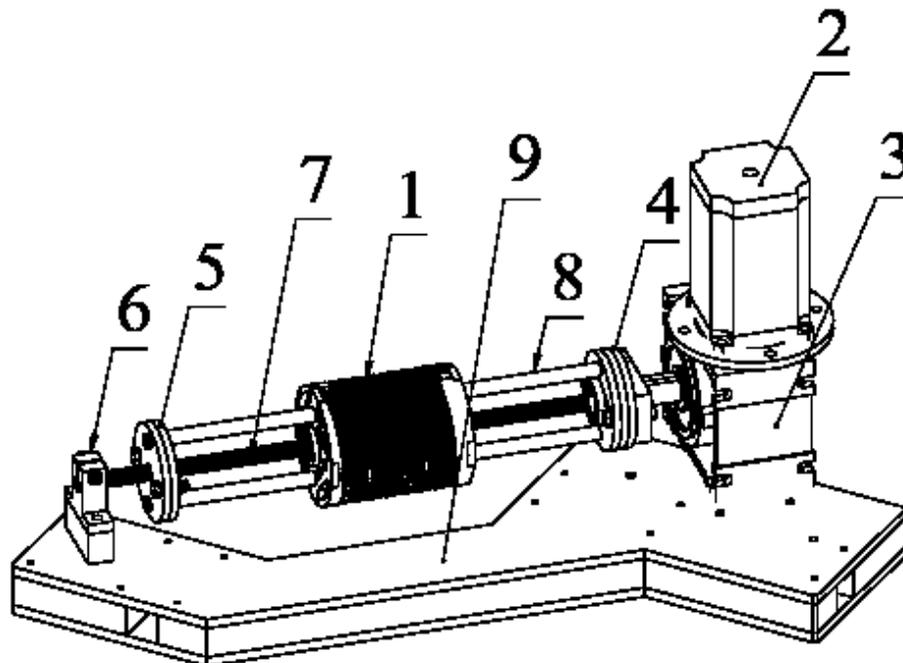
Planos

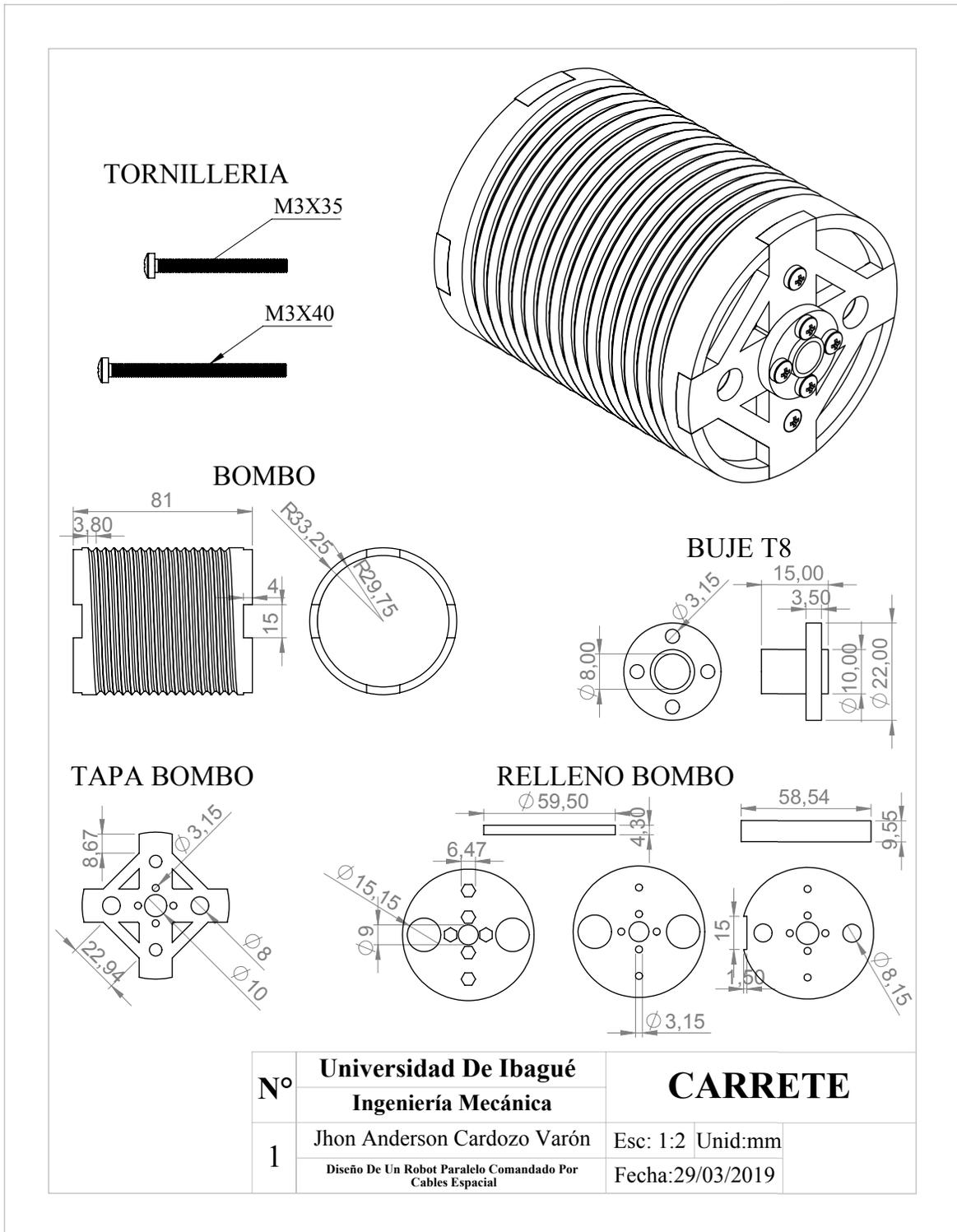
Tabla 6.1: Tabla de piezas en sus respectivos planos

Nombre De Pieza	Material	N° Plano
Carrete	PLA	1
Motor Nema23	Acero	2
Caja reductora NVMR30	Acero	3
Soporte eje potencia a	MDF	4
Soporte eje potencia b	MDF	5
Soporte SK8_mm	Acero	6
T8 x 300 mm	Acero	7
Eje liso 8 x 271.8 mm	Acero	8
Modulo del recolector	MDF	9
Estructura del sistema de polea	MDF	10
Polea y eje	PLA - Acero	11
Base del sistema de polea	MDF	12
Efector 3D	MDF	13
Unión inferior	MDF	14
Unión Superior	MDF	15

SISTEMA RECOLECTOR

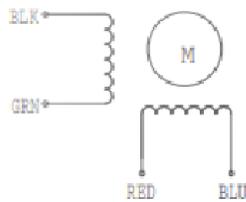
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	carrete	PLA	1
2	motor_nema_23	Acero	1
3	NMRV30	Acero	1
4	soparte_eje_potencia_a	MDF	1
5	soparte_eje_potencia_b	MDF	1
6	soparte_SK8_mm	Acero	1
7	eje_T8_mm_300_mm	Acero	1
8	eje_8_mm_271.8_mm	Acero	2
9	modulo_recolector	MDF	1





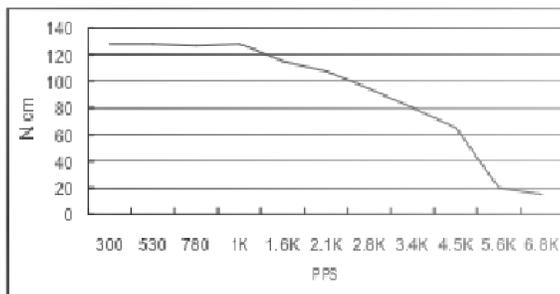
General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	3.2
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	2.8
Ambient Temperature (°C)	-20~+50	Resistance Per Phase ($\pm 10\%$ Ω)	1.13
Number of Phase	2	Inductance Per Phase ($\pm 20\%$ mH)	3.6
Insulation Resistance (M Ω)	100 Min (500VDC)	Holding Torque (N.cm)	189
Insulation Class	Class B	Weight (Kg)	1.05
Max.radial force (N)	75 (20mm from the flange)		
Max.axial force (N)	15		

● Wiring Diagram :

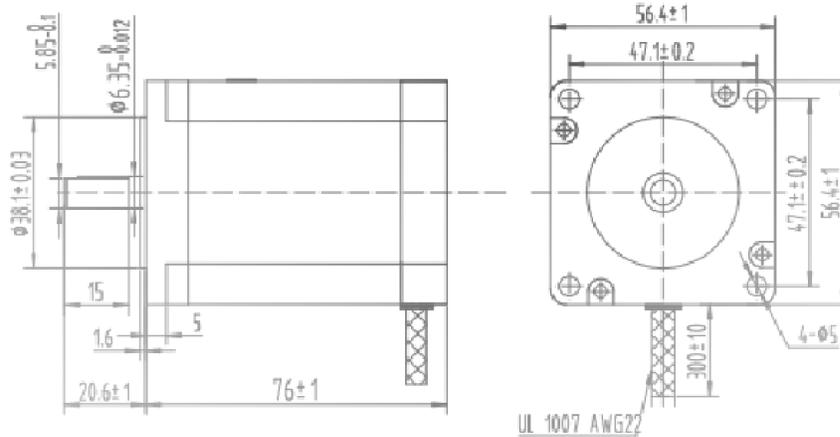


● Pull out torque curve :

VOLTAGE: 3.0VDC, CONSTANT CURRENT:2.8A, HALF STEP



● Dimensions:
(unit:mm)



N°	Universidad De Ibagué	NEMA 23	
	Ingeniería Mecánica		
2	Jhon Anderson Cardozo Varón	Esc: 1:1	Unid:mm
	Diseño De Un Robot Paralelo Comandado Por Cables Espacial	Fecha:29/03/2019	

Dimension:
Unit=mm

Wiring Diagram:

Specifications:

相数 Phase	2	备注 Comment
步距角 Step Angle	1.8 deg.	
电压 Voltage	4.8 V	
相电流 Current	3 A	
相电阻 Resistance	1.6 Ω	
相电感 Inductance	7.5 mH	
静力矩 Holding Torque	2.8 kg.cm	
绝缘等级 Insulation Class	B	
重量 Mass	1.5 kg	

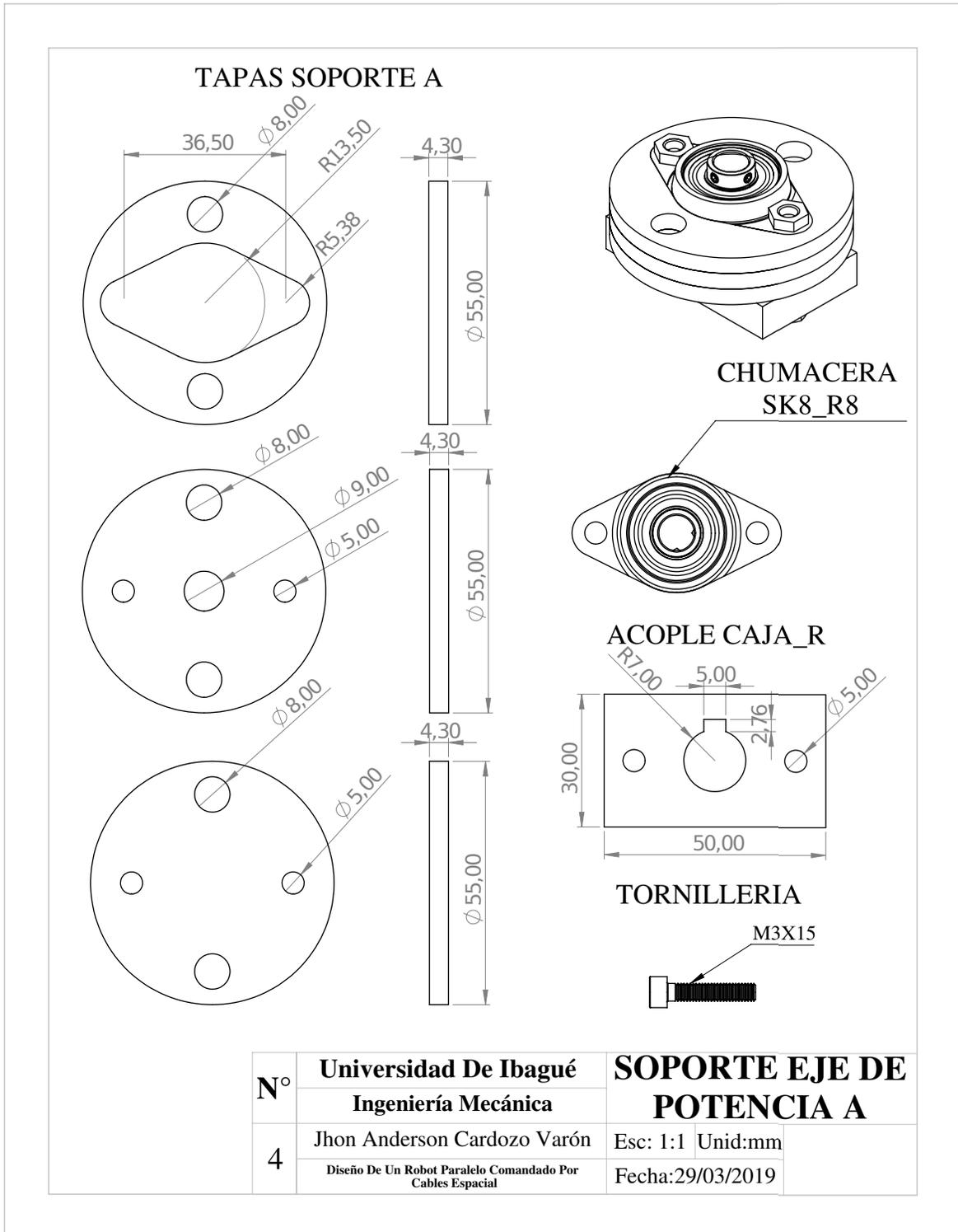
图号	图名	比例	日期	设计	审核	批准	材料	重量	比例	规格号
										57HS112-3004-03

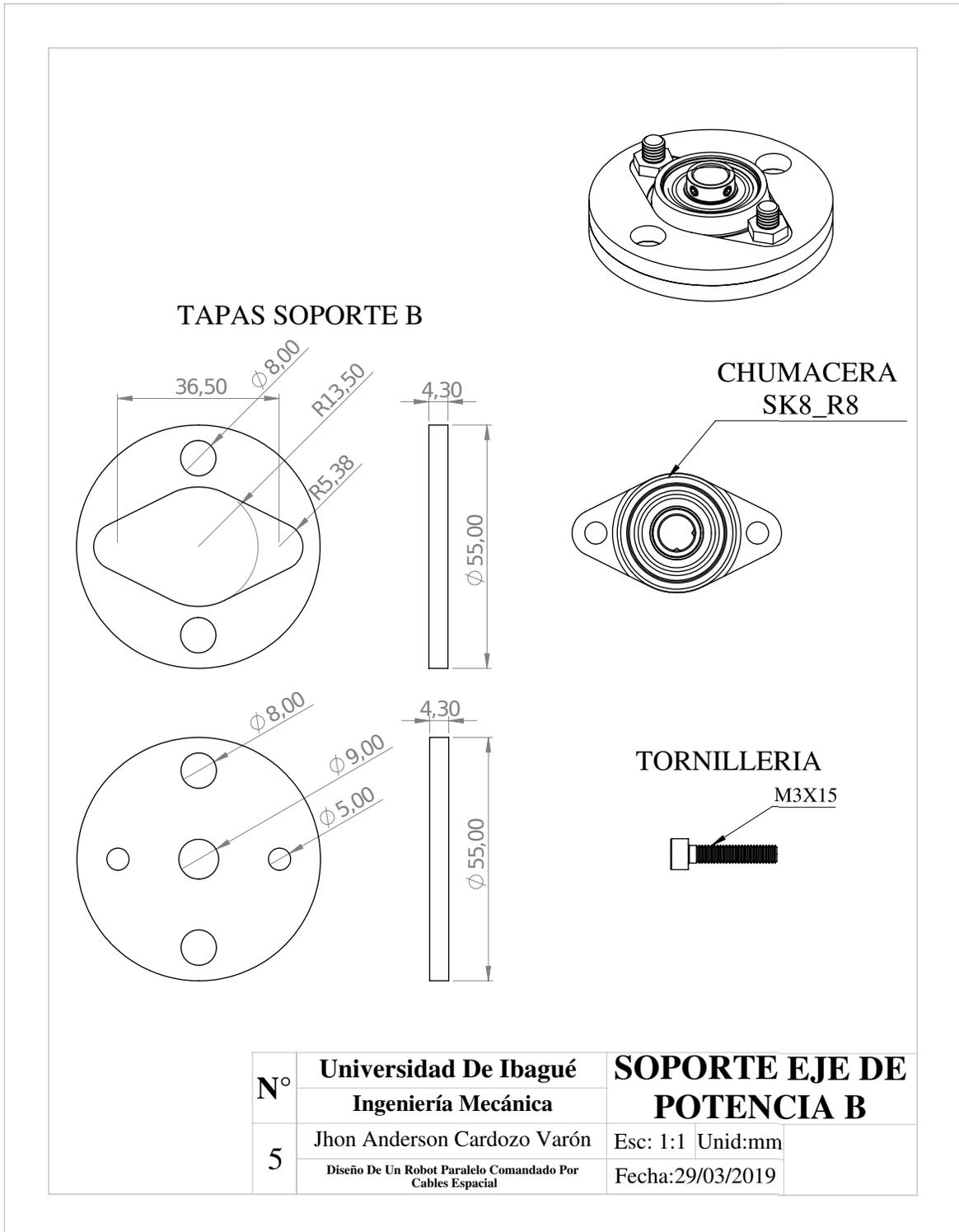
Output shaft

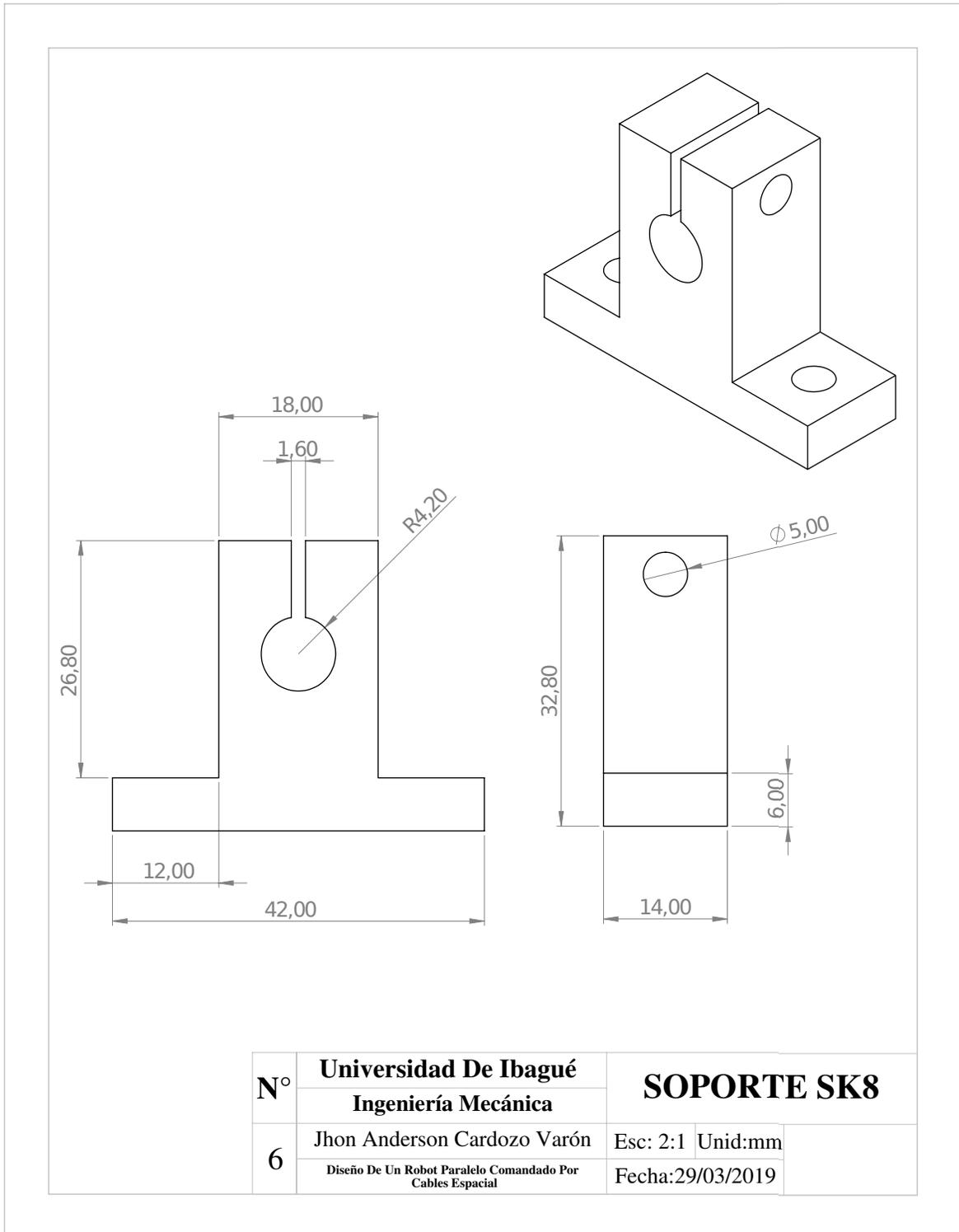
Key for the input motor

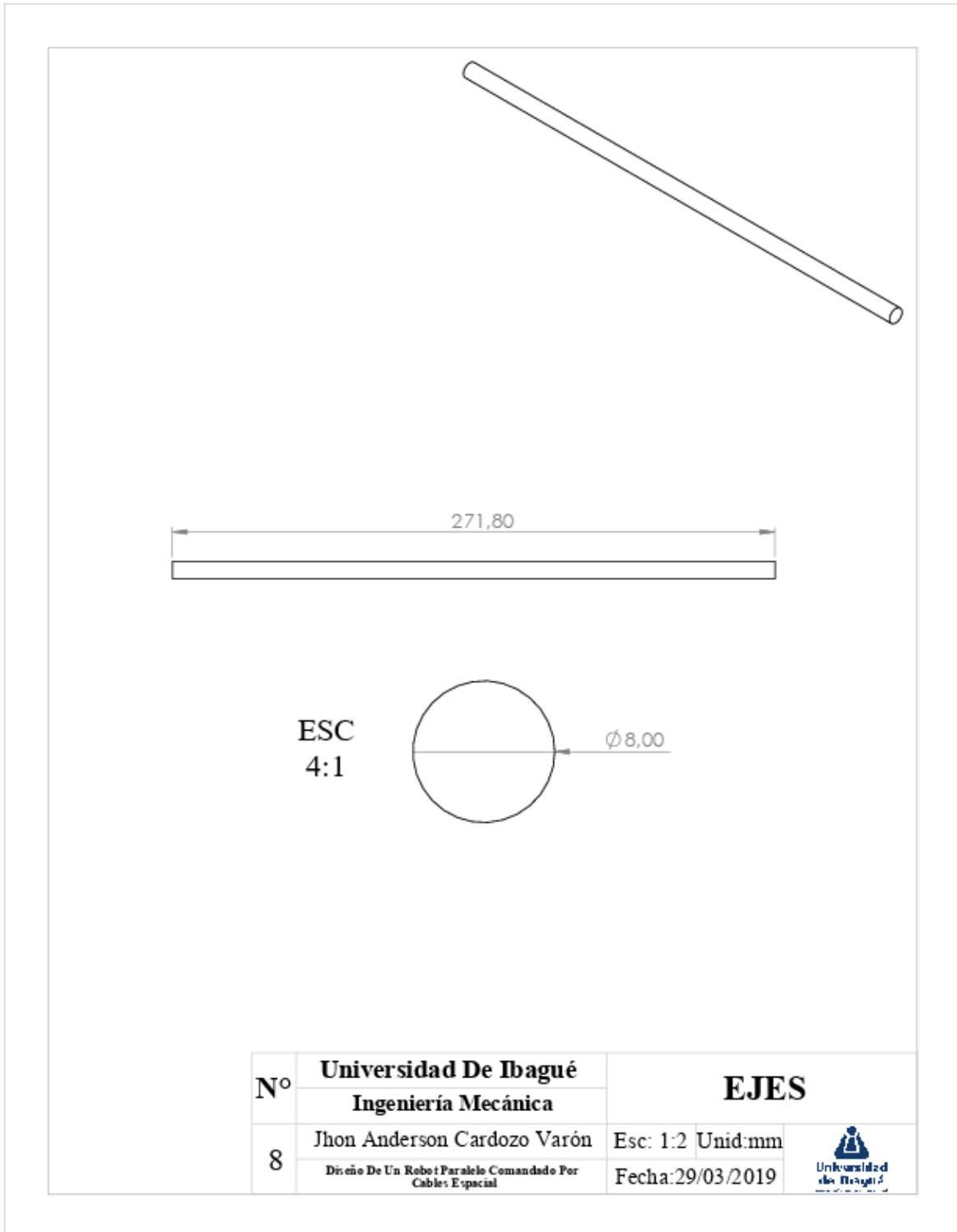
Key for the output shaft

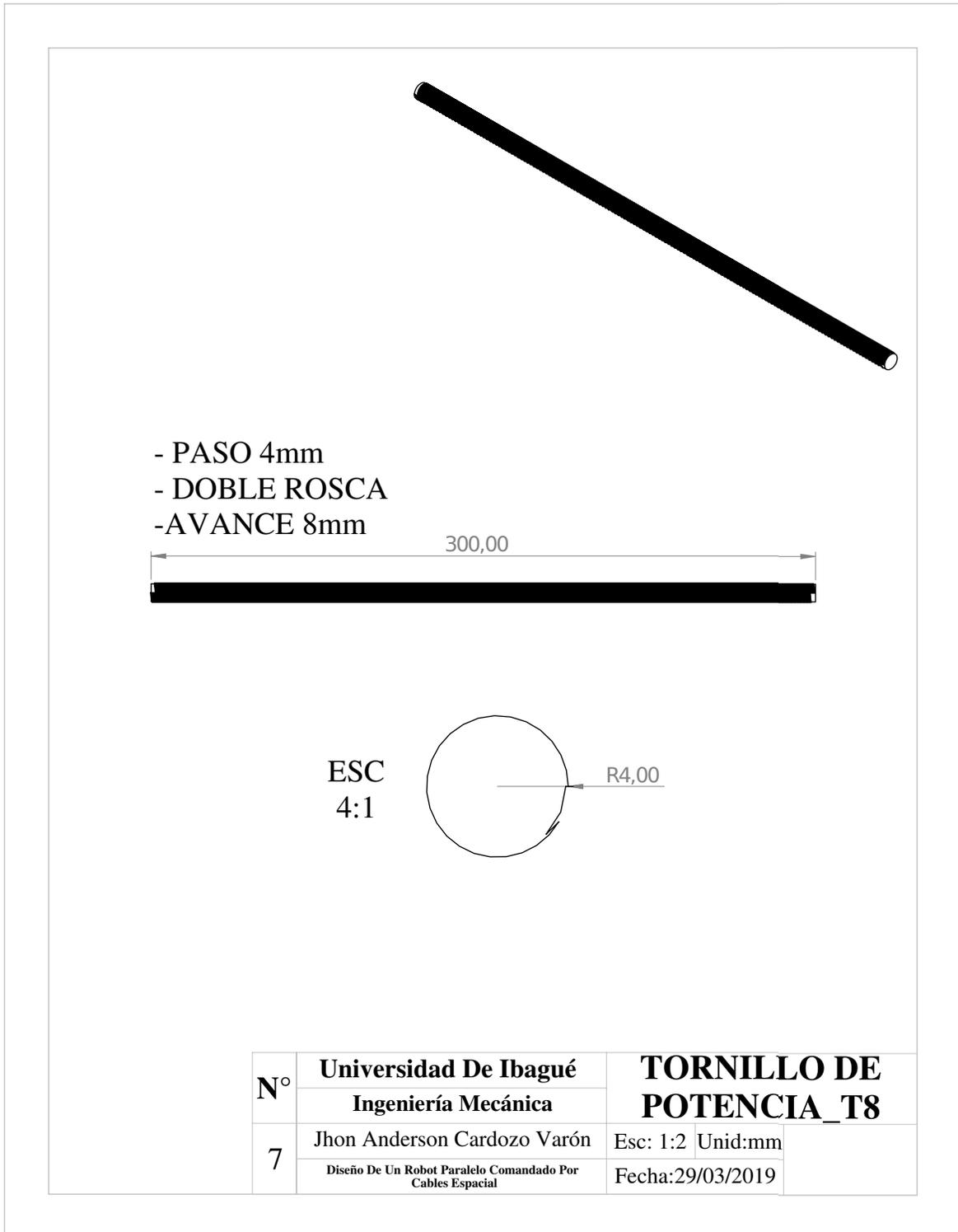
Nº	Universidad De Ibagué		CAJA REDUCTORA NMRV30 I:10	
	Ingeniería Mecánica			
3	Jhon Anderson Cardozo Varón		Esc: 1:1	Unid:mm
	Diseño De Un Robot Paralelo Comandado Por Cables Espacial		Fecha:29/03/2019	

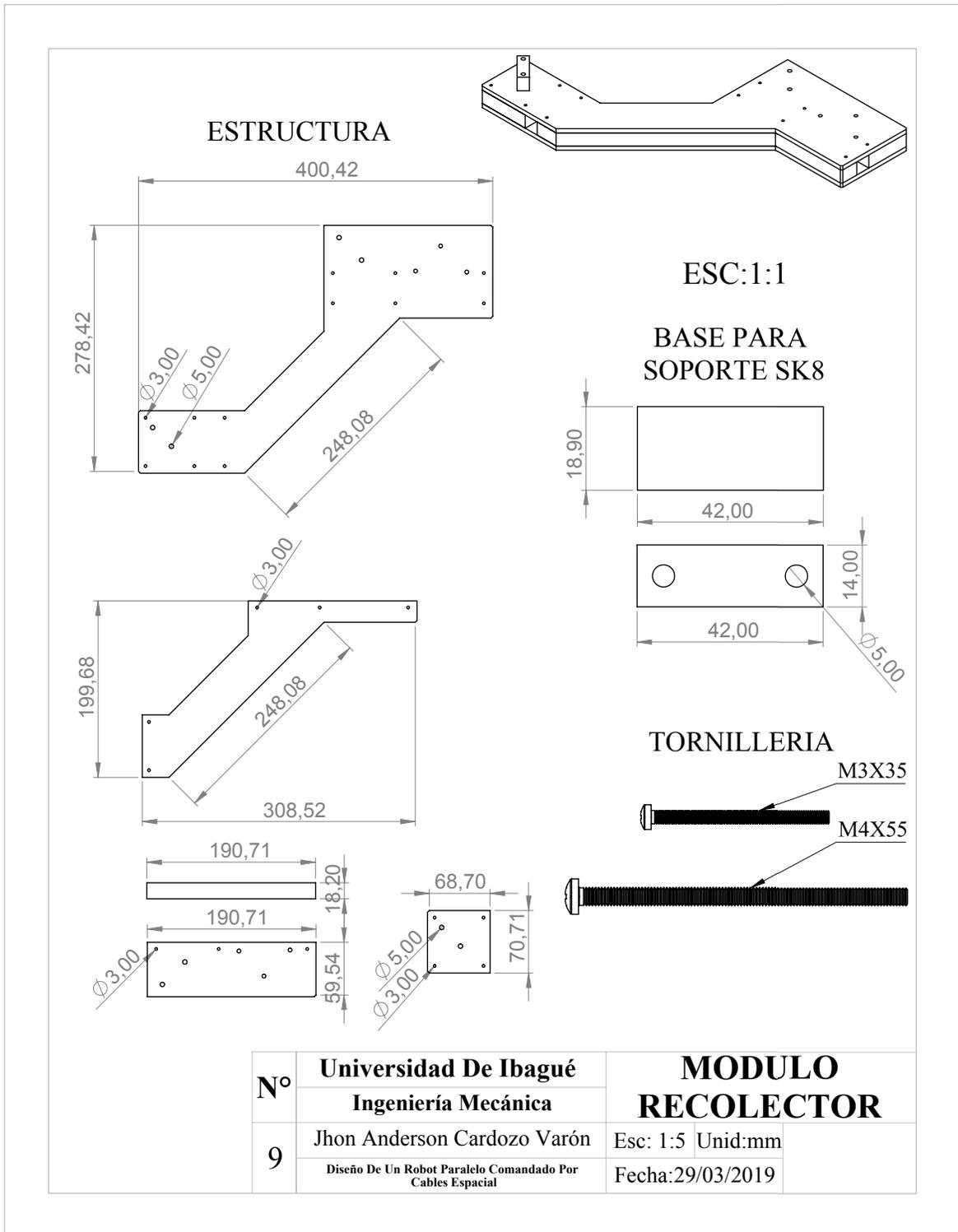






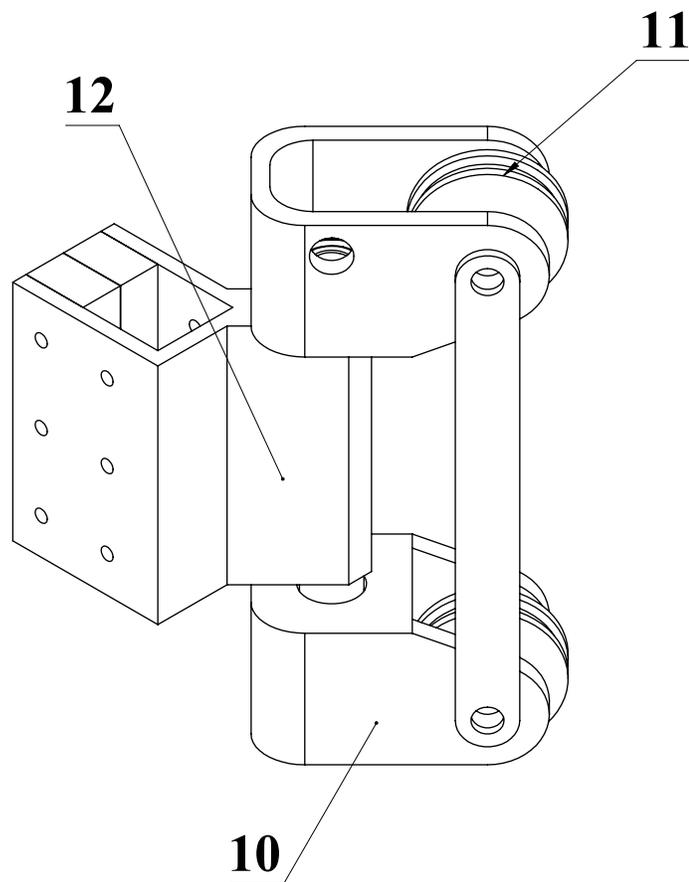


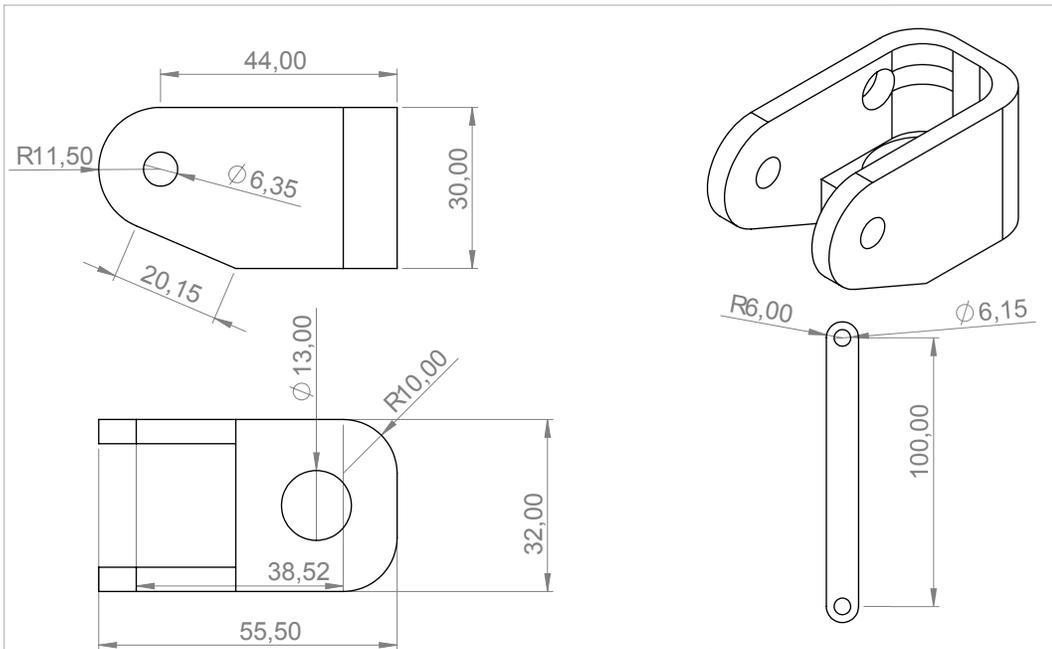




SISTEMA DE POLEAS

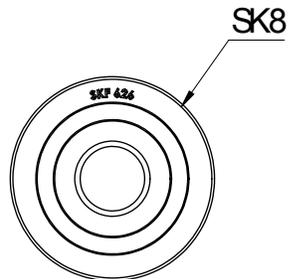
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
10	Soporte_polea_giratoria	PLA	2
11	polea_eje		2
12	Soporte_separador	PLA - MDF- Acrilico	1





TORNILLERIA

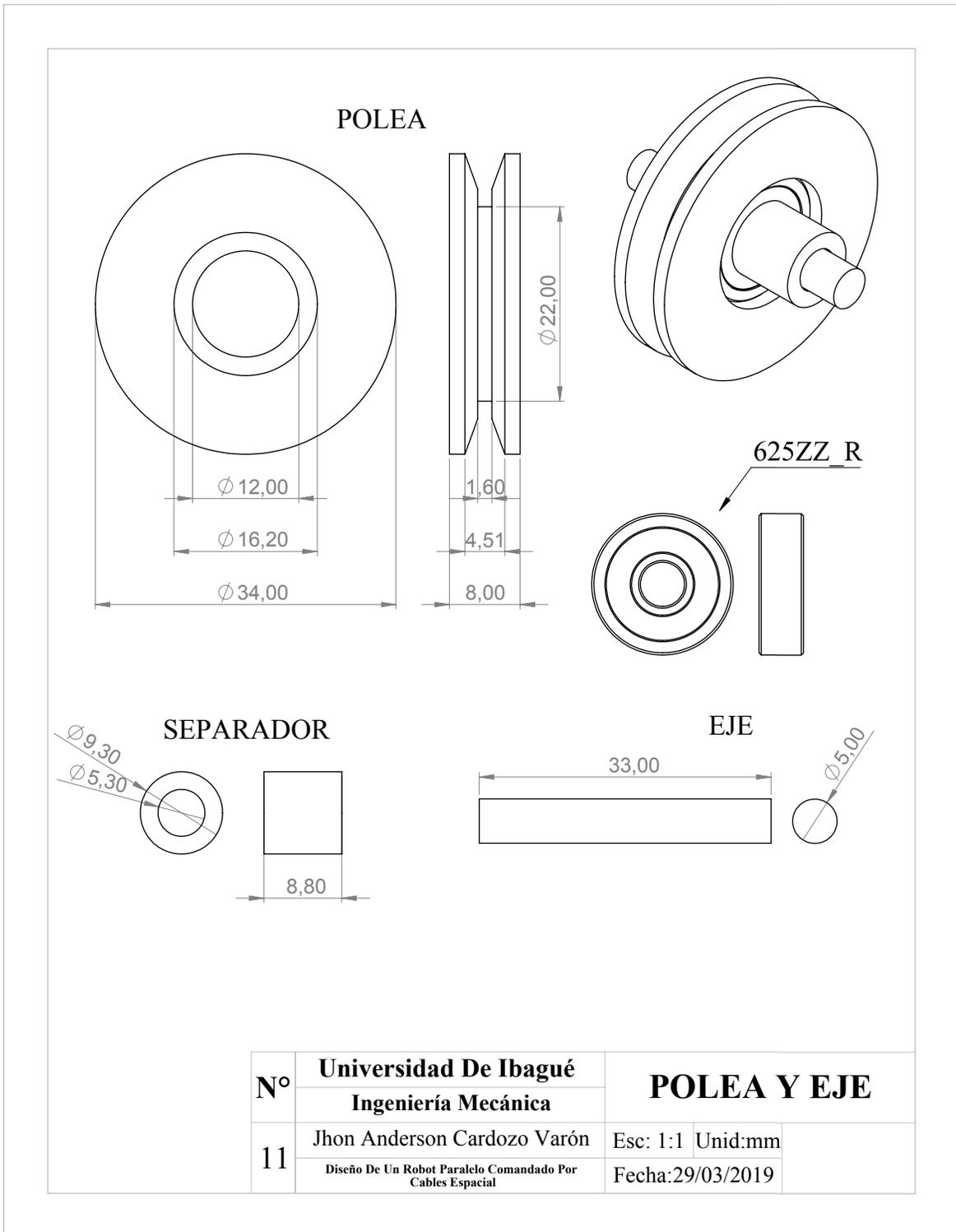
RODAMIENTO

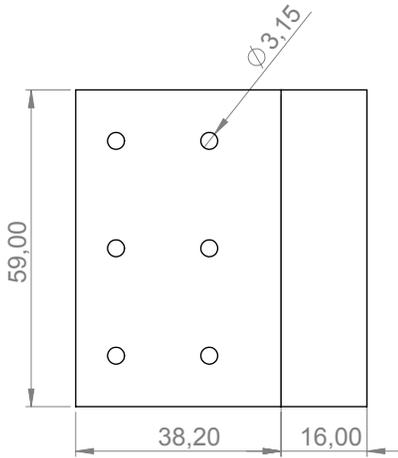
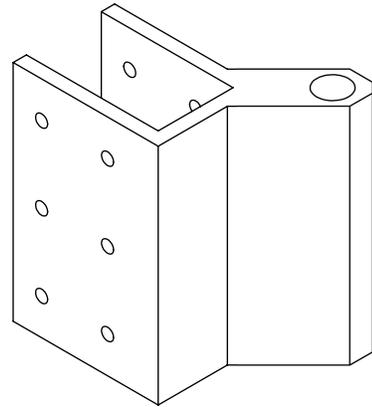
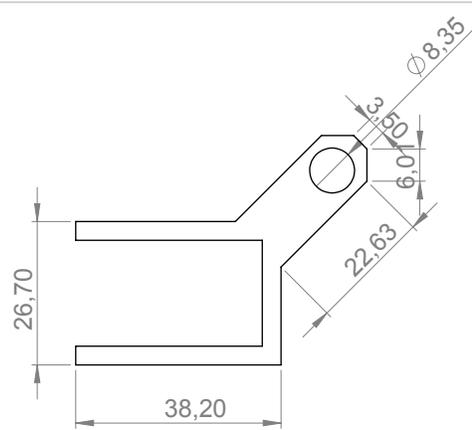


PERNO 5/ 16IN

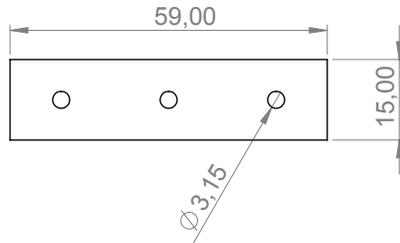
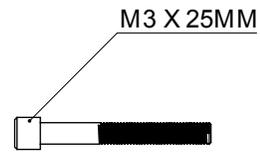
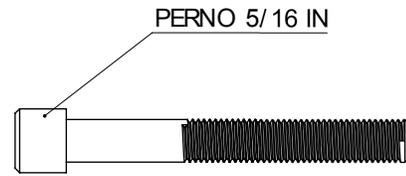


N°	Universidad De Ibagué	ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE POLEAS	
	Ingeniería Mecánica		
10	Jhon Anderson Cardozo Varón	Esc: 1:2	Unid:mm
	Diseño De Un Robot Paralelo Comandado Por Cables Espacial	Fecha:29/03/2019	

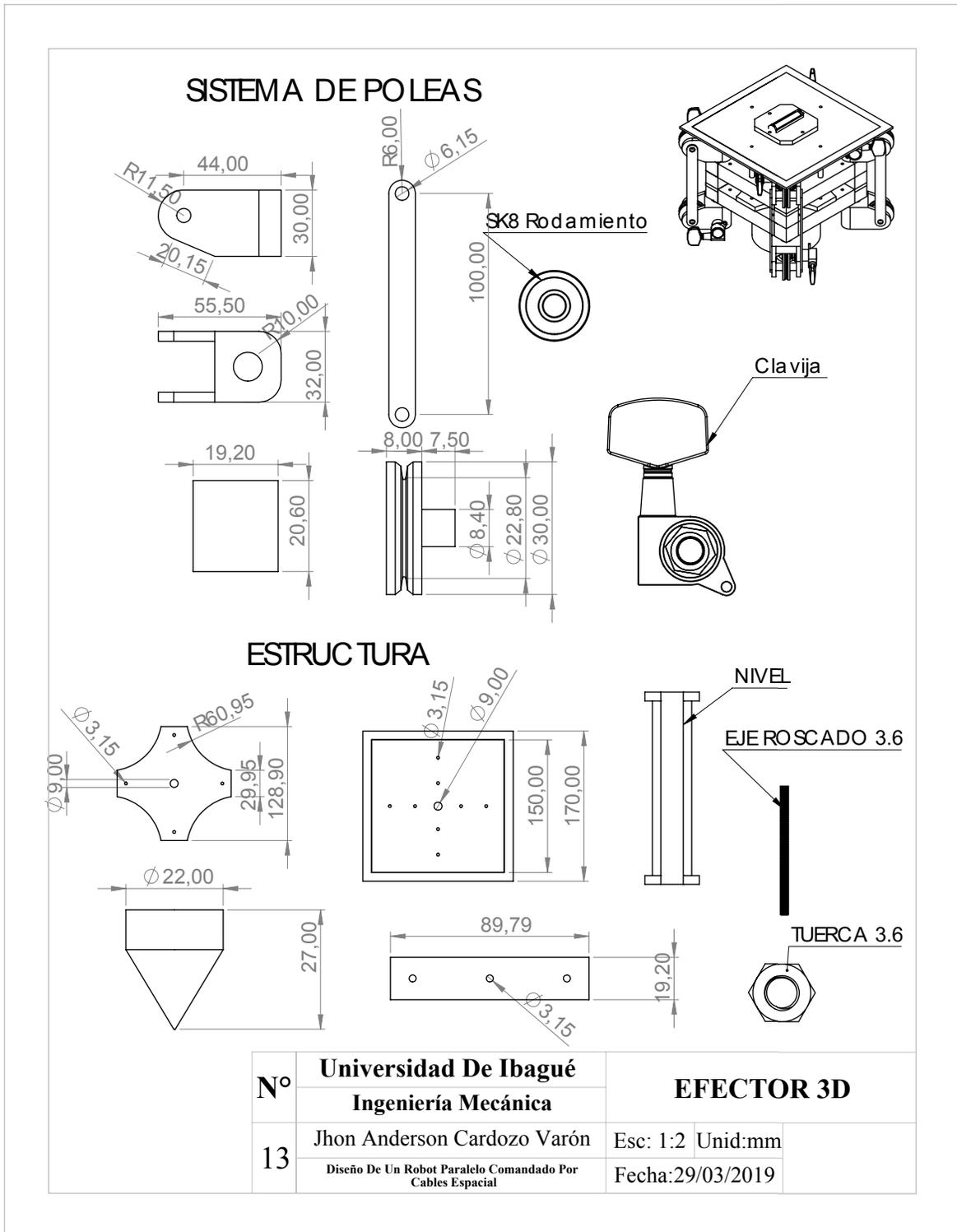


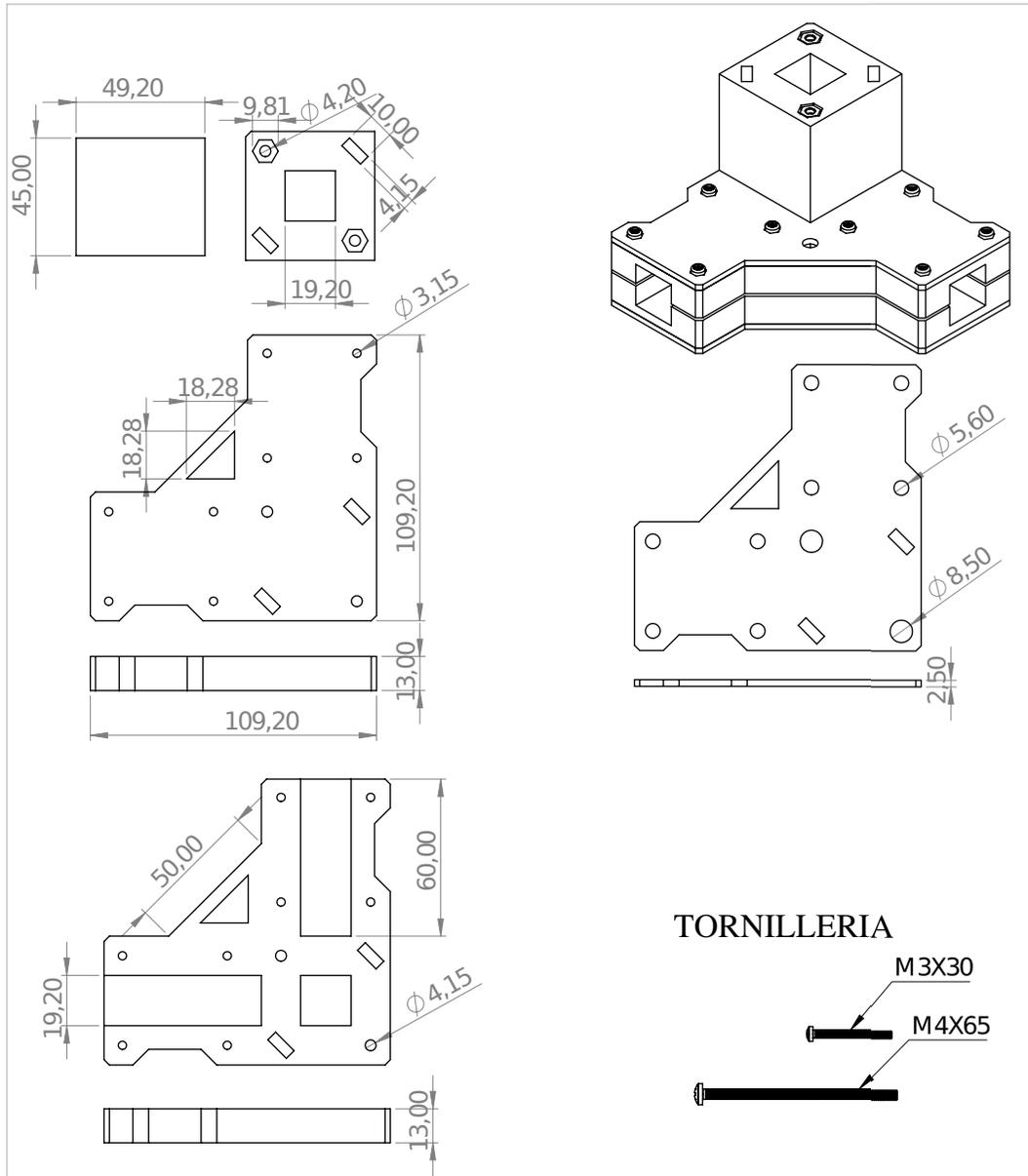


TORNILLERIA

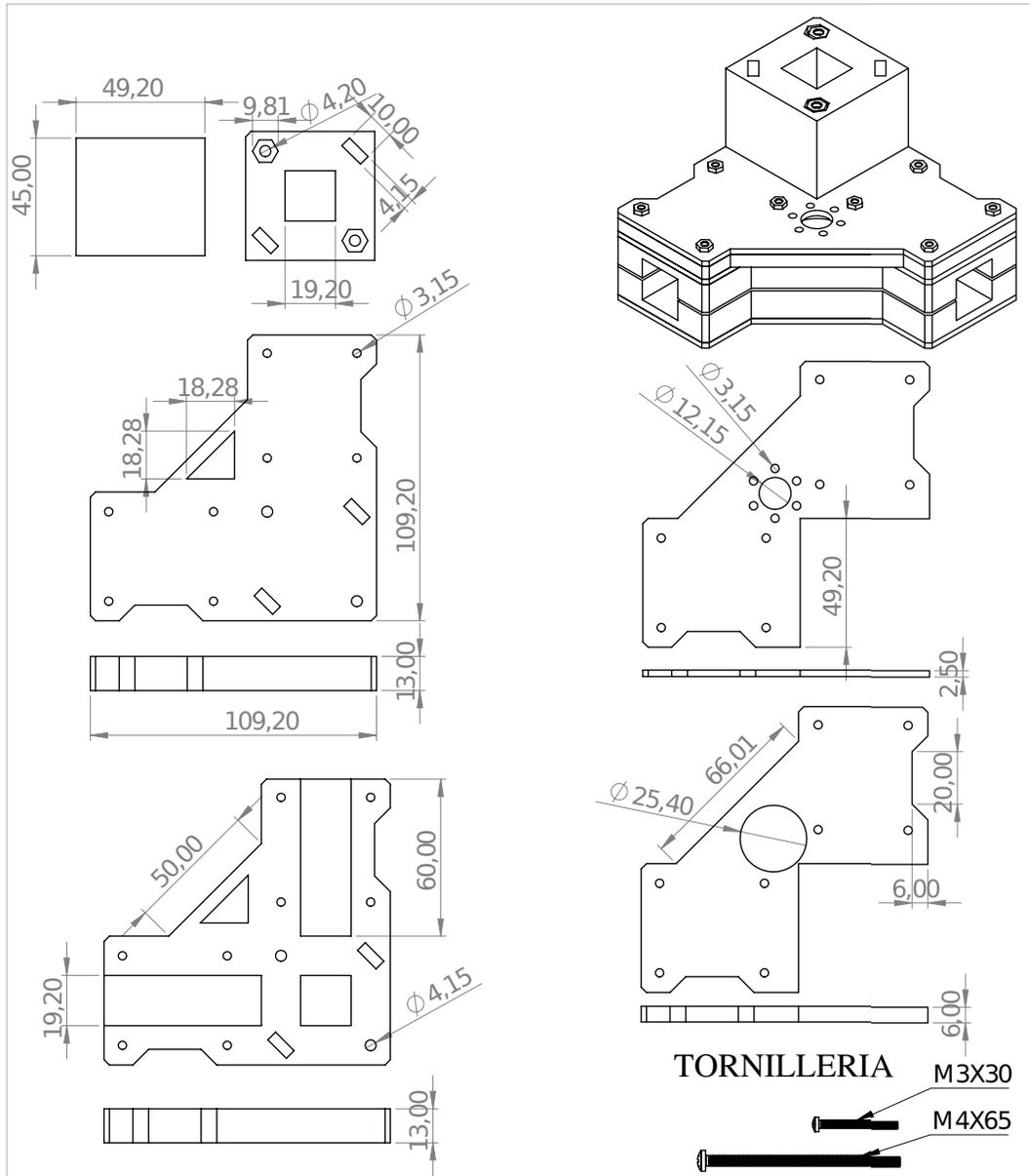


N°	Universidad De Ibagué	SOPORTE SEPARADOR	
	Ingeniería Mecánica		
12	Jhon Anderson Cardozo Varón	Esc: 1:1	Unid:mm
	Diseño De Un Robot Paralelo Comandado Por Cables Espacial	Fecha:29/03/2019	





N°	Universidad De Ibagué		UNIÓN INFERIOR	
	Ingeniería Mecánica			
14	Jhon Anderson Cardozo Varón		Esc: 1:2	Unid:mm
	Diseño De Un Robot Paralelo Comandado Por Cables Espacial		Fecha:29/03/2019	



N°	Universidad De Ibagué		UNIÓN SUPERIOR	
	Ingeniería Mecánica			
15	Jhon Anderson Cardozo Varón		Esc: 1:2	Unid:mm
	Diseño De Un Robot Paralelo Comandado Por Cables Espacial		Fecha:29/03/2019	

Presupuesto

Gracias a la colaboración del semillero MECAUTRONIC, liderado por Jorge Andres Garcia Vanegas fue posible la realización de este proyecto por lo cual se presenta en la siguiente Tab. 6.2, los costos totales y unitarios del RPCC espacial que se llevo a cabo durante el proceso de construcción. Por lo tanto esta etapa es muy importante ya que sabemos en factor monetario cuanto vale hacer este tipo de robots y que tan factible es llevarlo al campo de la industria.

La idea como se hablo anteriormente es que este prototipo sirva para fines educativos y de investigación, como se puede mostrar en la Tab. 6.2 se tuvo un costo total de \$ 3.018.117,52 mil pesos, en donde la mayor de su presupuesto fue en la compra de la caja reductor y motores, por lo que se puede notar que los valores de su fabricación fueron mínimos a comparados de otros robots de investigación como lo es el Ipanema, ReelMax, entre otros en donde su estructura es toda entre aluminio y acero pero equivale a precios altos en fabricación.



Tabla 6.2: Tabla de presupuesto total del RPCC del semillero MECAUTRONIC de la Universidad de Ibagué

Componente		Cantidad	Material	V.Unitario	V.Total
Marco					
Perfiles	Tubo cuadrado	18	Aluminio	\$ 4.450,00	\$ 80.100,00
Uniones	Inferior	4	MDF	\$ 10.000,00	\$ 40.000,00
	Superior	4	MDF	\$ 10.000,00	\$ 40.000,00
Tornillería	Tornillo M3 x 30	64	Acero	\$ 230,00	\$ 14.720,00
	Tuerca M3	64	Acero	\$ 125,00	\$ 8.000,00
	Tornillo M4 x 65	8	Acero	\$ 300,00	\$ 2.400,00
	Tuerca M4	8	Acero	\$ 135,00	\$ 1.080,00
Recolector					
Soporte	Soporte tornillo de potencia_SK8	4	MDF	\$ 12.000,00	\$ 48.000,00
	Soporte eje caja reductora	4	MDF	\$ 1.500,00	\$ 6.000,00
	Soporte base tornillo de potencia a	4	MDF	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	Soporte base tornillo de potencia b	4	MDF	\$ 4.000,00	\$ 8.000,00
	Modulo del recolector	4	MDF	\$20.000,00	\$60.000,00
Motor	Nema 23	4	Acero	\$ 225.676,00	\$ 902.704,00
Caja reductora	NVMR30	4	Acero	\$ 316.988,38	\$ 1'267.953,52
Carrete	Bombo PLA	8	PLA	\$ 7.000,00	\$ 56.000,00
	Soporte bombo	4	MDF	\$ 8.000,00	\$ 32.000,00
	Tapa bombo	8	MDF	\$ 2.000,00	\$ 16.000,00
	Rodamiento lineal	8	Acero	\$ 5.500,00	\$ 44.000,00
Ejes	Tuerca trapezoidal 8mm	8	Bronce	\$ 1.500,00	\$ 12.000,00
	Eje guia	8	Acero	\$ 1.000,00	\$ 8.000,00
	Tornillo de potencia	4	Acero	\$ 12.000,00	\$ 48.000,00
	Pin para eje	32	Acero	\$ 800,00	\$ 25.600,00
Tornillos	Tornillo M3 x 35	64	Acero	\$ 230,00	\$ 14.720,00
	Tuerca M3	64	Acero	\$ 125,00	\$ 8.000,00
	Tornillo M4 x 65	16	Acero	\$ 300,00	\$ 4.800,00
	Tuerca M4	16	Acero	\$ 135,00	\$ 2.160,00
Poleas					
Soporte	Soporte cojinete 4mm	8	MDF	\$ 1.000,00	\$ 8.000,00
	Soporte cojinete 9mm	8	MDF	\$ 1.500,00	\$ 12.000,00
	Soporte lateral 5,5mm	8	MDF	\$ 1.500,00	\$ 12.000,00
	Hub soporte eje	8	Aluminio	\$ 2.500,00	\$ 20.000,00
Polea	Polea PLA	8	PLA	\$ 1.300,00	\$ 10.400,00
	Rodamiento 5mm	8	Acero	\$ 3.100,00	\$ 24.800,00
Ejes	Eje polea 5mm	8	Acero	\$ 200,00	\$ 1.600,00
	Eje superior	4	Acero	\$ 1.000,00	\$ 4.000,00
	Eje inferior	4	Acero	\$ 800,00	\$ 3.200,00
Tornillos	Tornillo M3 x 20	32	Acero	\$ 230,00	\$ 7.360,00
	Tornillo M3 x 35	64	Acero	\$ 230,00	\$ 14.720,00
	Tuerca M3	96	Acero	\$ 125,00	\$ 2.000,00
	Tornillo M4 x 15	16	Acero	\$ 300,00	\$ 4.800,00
Tuerca M4	16	Acero	\$ 135,00	\$ 2.160,00	
Efecto final					
Estructura	Piezas en MDF	44	MDF	\$ 500,00	\$ 22.000,00
Ejes	Eje 6mm	8	Acero	\$ 500,00	\$ 4.000,00
Poleas	Polea PLA	8	PLA	\$ 1.300,00	\$ 10.400,00
Clavijas	Clavija de guitarra acústica	8	Acero	\$ 8.000,00	\$ 64.000,00
Rodamientos	Rodamiento radial 8mm	8	Acero	\$ 5.800,00	\$ 46.400,00
Tornillos	Tornillo M3 x 15	64	Acero	\$ 230,00	\$ 14.720,00
	Tornillo M3 x 10	32	Acero	\$ 230,00	\$ 7.320,00
	Tuerca M3	96	Acero	\$ 125,00	\$ 4.000,00
Σ				\$ 678.599,38	\$ 3.018.117,52