

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D

**Andrés Felipe Ariza Rodriguez
Omar Andrés Garzón Cansimancy
William Quintero Rozo**

**Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Mecatrónica
Bogotá
2014**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D

**Andrés Felipe Ariza Rodriguez
Omar Andrés Garzón Cansimancy
William Quintero Rozo**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecatrónico**

**Dirigida por: Dagoberto Ortiz
Ingeniero Electricista**

**Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central
Mecatrónica
Bogotá
2014**

Nota de aceptación:

Responsabilidad. Ni la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, ni el Asesor, ni los Jurados calificadores son responsables de las ideas expuestas por los autores del Trabajo de Grado.

Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Bogotá, Mayo de 2014

Dedicado a mi Padre, por el apoyo indispensable que me ha brindado desde todo punto de vista, de igual forma por la educación y enseñanzas que me inculcó, gracias a él mi vida es diferente y puedo llegar a acceder a grandes cosas.

Andrés Felipe Ariza Rodriguez

Este trabajo quiero dedicarlo a mi hijo Tomás David, es la luz de mis ojos, la razón de mi felicidad, mi motor de vida y quien me impulsa a ser la mejor versión de mi cada día.

Omar Andrés Garzón Cansimancy

Dedicado a Mi esposa e hija, quienes con su apoyo, sacrificio y comprensión hicieron más fácil el arduo trabajo que conllevo la culminación de este reto.

William Quintero Rozo

El presente trabajo, es fruto del gran esfuerzo que he hecho por llevar a cabo la carrera de ingeniería en Mecatrónica, agradezco a mis compañeros, aquellos que estuvieron en mi proceso de formación y con los cuales nos servimos como buenos amigos para nuestro progreso colectivo, a ellos les deseo lo mejor para sus vidas y mi apoyo incondicional para cuando lo requieran, por último agradezco a los profesores del Instituto Técnico Central que se vieron involucrados en mi proceso de formación, por sus exigencias, por su disposición y en particular a aquellos que hacen la diferencia con ideas y proyectos en pro del desarrollo de la academia.

Andrés Felipe Ariza Rodriguez

En primer lugar mis agradecimientos van dirigidos a Dios, quien ha sido mi fortaleza y la de mi familia en todas las etapas de nuestras vidas, a mi madre quien es el héroe de mi vida, a mi padre por sus oraciones y bendiciones, a Martín y Luis Cansimansy por los aportes importantes a lo largo de mi carrera y mi vida, en general a toda mi familia, a mis compañeros de tesis y a cada uno de los profesores que de una u otra forma aportaron a este trabajo.

Omar Andrés Garzón Cansimancy

Agradezco a Dios por poner frente a mí la oportunidad de ser profesional, a los docentes y directivos de la ETITC, quienes pueden ver en este documento los frutos del conocimiento y apoyo transmitido, en especial a aquellos que lograron despertar la curiosidad y deseo de indagar aún más en sus asignaturas, a mi familia, en especial a mi Abuela, pues sin su impulso y apoyo no hubiese iniciado este camino y a mis compañeros de trabajo de grado, pues sin ellos la culminación de este camino no habría sido posible.

William Quintero Rozo

RESUMEN

El presente trabajo describe el proceso de diseño y construcción de un prototipo de robot Delta enfocado a la impresión 3D, considerada como la segunda revolución industrial, no solo por el avance tecnológico que ha significado la construcción de las impresoras, sino por el aporte significativo que ha representado a distintas áreas de investigación y desarrollo a nivel educativo e industrial.

Se han tomado como base los conocimientos en robótica aprendidos dentro de la institución en la selección del tipo de robot a construir, sin dejar de lado las actuales soluciones ofrecidas por la industria, convirtiendo esta propuesta en una solución accesible desde el punto de vista económico sin sacrificar las prestaciones de precisión, resolución y procesamiento de archivos CAD.

Adicionalmente se pretende implementar los conocimientos adquiridos en otras áreas con el fin de complementar el trabajo, diseñando una interfaz de usuario que permita a un futuro usuario un control sencillo de la impresora, que incluya la exportación de archivos CAD, control de motores e implementación de los cálculos matemáticos del robot, desde Matlab.

Inicialmente se recorre el desarrollo evolutivo, tanto del robot delta como de la impresión 3D, de tal forma que se hacen evidentes los motivos que llevaron a pensar en su unificación, posteriormente se encuentra la información referente a la determinación de las características físicas y funcionales que definen el alcance del proyecto así como los cálculos que posibilitan el cumplimiento de las mismas.

Para finalizar se describe el modelado matemático del robot necesario para la aplicación, el desarrollo de la interfaz de usuario, el proceso de construcción, el desarrollo de las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	17
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	21
3.1. OBJETIVO GENERAL	21
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
4. MARCO REFERENCIAL	22
4.1. Parallix LKF-240	22
4.2. Metodología de rediseño de un robot paralelo tipo Delta de 3-GDL en función de un espacio de trabajo prescrito.	23
4.3. Análisis cinemático y simulación de un robot paralelo de estructura 6-RSS	24
4.4. Diseño hacia ensamble y manufactura de un prototipo robótico experimental tipo Delta	25
4.5. Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas	25
5. MARCO CONCEPTUAL	27
5.1. Robot	27
5.1.1. Mecánica del robot	27
5.1.2. Transmisiones	28
5.1.3. Actuadores	29

5.1.4.	Sensores	29
5.1.5.	Elementos Terminales	30
5.1.6.	Localización Espacial	30
5.1.7.	Cinemática del robot	31
5.1.7.1.	Cinemática Directa	31
5.1.7.2.	Cinemática Inversa	31
5.1.7.3.	Configuraciones Singulares	32
5.2.	ROBOT DELTA	33
5.3.	IMPRESORAS 3D	34
5.3.1.	Tipos de Impresión	35
5.3.1.1.	Estereolitografía	35
5.3.1.2.	Impresión por láser	35
5.3.1.3.	Impresión por inyección	35
5.3.1.4.	Impresión por deposición de material fundido	35
6.	ALCANCE Y LIMITACIONES	37
6.1.	Alcances	37
6.2.	Limitaciones	37
7.	DISEÑO METODOLÓGICO	38
7.1.	Actividades a realizar	38
7.1.1.	Definición de las características del prototipo.	39
7.1.2.	Recopilación de información.	39
7.1.3.	Diseño del modelo cinemático directo e inverso del robot.	39
7.1.4.	Diseño del modelo mecánico.	39
7.1.5.	Diseño electrónico	40
7.1.6.	Simulación del modelamiento aplicando los diseños previos.	40

7.1.7. Construcción el prototipo del robot.	40
7.1.8. Puesta a punto del robot.	41
7.1.9. Entrega documento final.	41
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
8.1. Arquitectura del Robot	42
8.1.1. Determinación de grados de libertad (GDL)	43
8.2. Análisis Geométrico	44
8.3. Modelo Cinemático	47
8.3.1. Modelo Cinemático Inverso	48
8.3.2. Modelo Cinemático Directo	50
8.4. Diseño Mecánico	51
8.4.1. Modelo físico	51
8.4.1.1. Base fija	52
8.4.1.2. Eslabón Brazo	52
8.4.1.3. Eslabón Antebrazo	53
8.4.1.4. Base Móvil	54
8.4.1.5. Otros aspectos a tener en cuenta	55
8.4.2. Cálculo y definición de las dimensiones críticas del Robot Delta	56
8.4.3. Diseño de los elementos del Robot	62
8.4.3.1. Diseño de la Base Móvil	63
8.4.3.2. Diseño eje antebrazo	69
8.4.3.3. Selección de Rótulas	73
8.4.3.4. Diseño del Antebrazo	78
8.4.3.5. Diseño eje brazo	80
8.4.3.6. Diseño del Brazo	84
8.4.3.7. Soportes de Fijación Servomotores	85

8.4.3.8. Diseño de la base fija	86
8.4.3.9. Diseño Estructura de Soporte	89
8.4.4. Selección de Motores	93
8.4.4.1. Torque motores (Holding Torque)	93
8.4.4.2. Análisis de los Torques en Función de las Trayectorias	96
8.4.5. Proceso de Selección	98
8.5. DISEÑO ELÉCTRICO	108
8.5.1. Esquema de conexión	109
8.6. FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT	110
8.6.1. Creación de una pieza en un software CAD	110
8.6.2. Exportar dicha pieza en una extensión .stl	111
8.6.3. Abrir la pieza en extensión .stl con el software Silc3r	112
8.6.4. Generar un archivo con extensión .gcode	114
8.6.5. Abrir la interfaz gráfica hecha en Matlab	115
8.6.6. Exportar el archivo en .gcode	116
8.6.7. Generar la matriz de coordenadas	116
8.6.8. Generar matriz de ángulos de los motores	120
8.6.9. Conectar con Arduino	120
8.6.10. Configuración de Arduino	121
8.6.11. Secuencia de los movimientos del motor	121
9. CONCLUSIONES	122
10. DIVULGACIÓN	124
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXOS	126

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1. Robot Parallix LKF-240	22
2. Espacio de trabajo deseado	23
3. Partes y diagrama de uniones	25
4. Diagrama de flujo GAs	26
5. Tipos de articulaciones ¹	28
6. Robot Delta Final	33
7. Partes del robot	42
8. Base y Plataforma	43
9. Geometria del Robot	44
10. Triángulo ABC	48
11. Estructura Básica	52
12. Detalle Paralelogramo	53
13. Cadena Cinemática	54
14. Radio mayor	56
15. Brazo	56
16. Antebrazo	57
17. Base Móvil	57
18. Volumen de Trabajo	59
19. Volumen de trabajo disminuyendo L1	61
20. Volumen de trabajo final	62
21. Diseño Base Móvil	63
22. Base Móvil Sólida	64
23. Volumen Base Móvil	65

24. Cargas Base Móvil	66
25. Fuerza de la carga	66
26. Fuerzas y restricciones	67
27. Resistencia Base Móvil	68
28. Resultados Base Móvil	68
29. Esfuerzo Máximo base móvil	69
30. Cargas en Ejes	70
31. Diagrama de esfuerzo	71
32. Diagrama de momento	72
33. Rótulas	73
34. Catálogo Rótulas	74
35. Catálogo Rótulas 2	75
36. Ángulo Rótulas	75
37. Plano Eje	76
38. Eje Sólido	76
39. Orientación Rótulas	77
40. Tuerca	77
41. Reacciones Antebrazo	78
42. Volumen Antebrazo	80
43. Fuerzas Antebrazo	81
44. Cuerpo Libre Eje Antebrazo	81
45. Esfuerzos Eje Antebrazo	82
46. Momentos Eje Antebrazo	83
47. Brazo Sólido	84
48. Volumen Brazo	85
49. Soporte Servomotores	85
50. Base Fija	87

51.	Cargas Base Fija	87
52.	Simulación Base Fija	88
53.	Esfuerzo máximo base fija	88
54.	Vigas Estructura	90
55.	Cargas Estructura	91
56.	Resultados Estructura	91
57.	Esfuerzo máximo estructura	92
58.	Robot Delta Final	93
59.	Robot en SimMechanics	94
60.	Ajustes Simulink	95
61.	Movimiento un servomotor	96
62.	Movimiento dos servomotores	96
63.	Movimiento tres servomotores	97
64.	Movimiento tres servomotores diferente trayectoria	97
65.	Catálogo Dynamixel	99
66.	Catálogo Dynamixel	99
67.	Demostración 1	100
68.	Demostración 2	101
69.	Catálogo Dynamixel	102
70.	Demostración 3	103
71.	Catálogo Dynamixel	104
72.	Catálogo Dynamixel	105
73.	Demostración 4	106
74.	Conexión con Arduino	109
75.	Configuración de Parámetros	112
76.	Slic3r	113
77.	Exportación Silc3r	114

78. Definición Parámetros Silc3r	114
79. Abrir Archivo	119
80. Ventana Ok	120
81. Plano Antebrazo	126
82. Plano Brazo	127
83. Plano Base Fija	128
84. Plano Base Móvil	129
85. Plano Eje Antebrazo	130
86. Plano Eje Servomotor	131
87. Plano Pie de Amigo	132
88. Plano Soporte Motor	133
89. Plano Viga Base	134
90. Plano Viga Horizontal	135
91. Plano Viga Vertical	136
92. Diagrama de flujo (1)	137
93. Diagrama de flujo (2)	138
94. Diagrama de flujo (3)	139
95. Diagrama de flujo (4)	140
96. Diagrama de flujo (5)	141
97. Diagrama de flujo (6)	142
98. Diagrama de flujo (7)	143

LISTA DE TABLAS

	pág.
1. Servomotores	107

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo hace referencia al proceso de diseño y construcción de un prototipo de robot paralelo tipo delta.

Los robots Delta son usados en múltiples aplicaciones, especialmente en aquellas donde se precisa contar con alguno de los dos factores caracterizan a este tipo de robot, velocidad y precisión.

En este caso, su diseño está ligado a permitir su aplicación en el proceso de impresión 3D, el cual, además de requerir de sus características principales, necesita el desarrollo de una interfaz que permita, a grandes rasgos, tomar el archivo de una pieza elaborada en un software CAD y realizar todo el proceso que permita al robot realizar las trayectorias necesarias para la impresión de dicha pieza.

Por consiguiente, el uso del robot está condicionado a su comunicación permanente con un computador.

El desarrollo de este trabajo fue impulsado por la necesidad que tiene la ETITC de contar con un robot paralelo en su laboratorio de robótica y por el deseo de los autores de, en un futuro próximo, poder construir y comercializar impresoras 3D basadas en este tipo de robots. De tal forma que este proyecto se convierta en el inicio de una empresa dirigida a la impresión 3D.

La teoría necesaria para la ejecución del presente trabajo fue obtenida en primera medida y de forma básica dentro de las aulas de la ETITC, adicionalmente se complementó mediante un proceso investigativo basado en consultas a material referente al tema en cuestión y conversaciones esporádicas con el personal docente de la ETITC que permitieran resolver inquietudes puntuales y generar opiniones o recomendaciones sobre el tema.

En el contenido de este documento se encuentra desarrollado de forma detallada el proceso de diseño de cada uno de los componentes del robot, así como el marco referencial que permite un mejor entendimiento del tema.

De igual manera se describe el proceso de construcción, incluyendo el del ensamblaje final que permite hacer entrega de un robot delta funcional para fines educativos al laboratorio de robótica de la ETITC.

Al finalizar se concluye identificando los componentes óptimos para la construcción del robot comercial, posibles mejoras y recomendaciones generales.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Al iniciar los estudios de pregrado en Mecatrónica se suelen generar una serie de expectativas acerca del conocimiento que al final del proceso será adquirido y la capacidad que se tendrá para implementar dicho conocimiento.

A medida que pasa el tiempo se empieza a notar que el campo de acción es demasiado amplio y que es imposible pretender saberlo todo, es ahí donde se precisa fijar la mirada en un punto específico, de tal forma que se pueda enfocar lo aprendido en algo que despierte el mayor interés y deseo de sumergirse en ese tema en especial.

La ETITC se ha esforzado por incentivar, desde lo académico, la generación de empresa como una mejor opción de vida y aporte a la sociedad, tanto así, que una de las líneas de investigación institucionales aprobadas para la realización de trabajos de grado es: emprendimiento, gestión y desarrollo empresarial. Pero uno de los elementos más importantes para que una empresa no fracase en el intento es sin lugar a dudas el conocimiento del producto o servicio que se piensa ofrecer, y es allí donde se evidencia que todo lo aprendido durante la carrera es bastante pero a la vez muy poco.

Actualmente la ETITC cuenta con un laboratorio de robótica dotado con los elementos necesarios para la realización de prácticas con robots móviles y con un robot serial, pero carece de un robot paralelo en su inventario, de tal manera que al finalizar la carrera, los estudiantes quedan con el vacío generado por la ausencia de prácticas con este tipo de robots.

Los robots Delta son usados para diversas aplicaciones y es relativamente sencillo disponer de información profunda del desarrollo de algunas de ellas, sin embargo, la información disponible acerca de la aplicación de dichos robot en la impresión 3D es bastante escasa, por no decir nula.

La masificación de la impresión 3D promete generar una nueva revolución industrial y de hecho se podría decir que a diario surge un nuevo avance en el tema, avances que, para quienes quieren hacer parte de esta industria, también alejan la posibilidad de hacer parte del negocio si no se está actualizado en el tema.

El presente trabajo no pretende realizar grandes aportes a dicha industria, ya que para poder aportar, primero se debe conocer a profundidad el producto, de tal manera

que este proyecto busca permitir la profundización en el tema de los robots delta, su aplicación en la impresión 3D y un acercamiento físico al funcionamiento, detección de fallas y planteamiento de posibles soluciones a través de la implementación de un primer prototipo que permita a los futuros estudiantes de Ingeniería Mecatrónica disponer de un nuevo elemento de estudio en su laboratorio y a los autores la posibilidad de incursionar en mejores condiciones en el creciente negocio del prototipado rápido.

2. JUSTIFICACIÓN

Querer ser parte importante del desarrollo humano visto desde la perspectiva tecnológica es tal vez el anhelo máspreciado de un ingeniero Mecatrónico, tener la oportunidad de aportar un grano de arena al inmenso conocimiento que desborda la humanidad debe ser su primordial objetivo, pero, pretender ser una pieza en el extraordinario mundo de la ciencia, tecnología y desarrollo no es un logro fácil de alcanzar; por el contrario implica tener un amplio conocimiento teórico y práctico de la rama en cuestión, además de gozar de una gran capacidad de visión enfocada al rendimiento, la eficiencia, la utilidad a la humanidad, en cada instante, en cada proceso, en cada vivencia, a partir de una idea que se le genere. Este proyecto enmarca varios aspectos que lo definen como un propósito ideal, útil, a la expectativa del desarrollo tecnológico, por un lado se tiene la impresión 3D o prototipado rápido, con un trayecto no muy amplio, pero con un futuro prometedor, tanto así que la hacen llamar como la próxima revolución industrial, éste campo de trabajo tiene innumerables aspectos por explotar, uno de ellos se puede definir como la herramienta que permite ejecutar la impresión y otro como la finalidad y/o campo de aplicación; para éste trabajo se tocará el tema de la herramienta que se usa para la impresión.

Por otro lado se encuentra la robótica una rama en constante desarrollo y muy flexible vista desde sus campos de aplicación, los robots son una herramienta que permiten agilizar procesos, trabajar con un mayor rango de calidad, evitan el esfuerzo humano, realizan operaciones que los seres no pueden hacer por sus condiciones orgánicas, entre otros, se han convertido en parte trascendental de la cotidianidad del ser. Los prototipos permiten a los equipos de diseño cambiar su concepto de producto con facilidad durante la primera fase del desarrollo. Los modelos pueden ser visualizados y criticados por una variedad de equipos funcionales en el seno de una misma organización. Los modelos rápidos y baratos de producir permiten imprimir múltiples piezas durante un proyecto y utilizarlas no sólo para hacer la presentación final, sino como parte del proceso creativo. Los prototipos de apariencia funcional son útiles para resolver problemas y para obtener un acuerdo sobre el diseño. Se pueden construir y transportar maquetas reducidas a emplazamientos de clientes para evaluación, eliminando frecuentemente la necesidad de enviar unidades de producción reales.

Las piezas 3D son una manera rápida y eficiente de identificar problemas y retos de un diseño en una fase muy temprana del proceso. Los robots Delta, debido a la poca masa de sus brazos que permiten la realización de múltiples maniobras por segundo se utilizan en la manipulación, debido a su estructura posee una gran rigidez, se utilizan para trabajos que exigen alta precisión.

Combinar las habilidades y destrezas de una herramienta como lo es un Delta, que ofrece uno de los mejores rendimientos en cuanto a velocidad y precisión; con una aplicación como la impresión 3D ó prototipado rápido ha dado como resultado un avance tecnológico bastante importante y aunque no es el primer ni único trabajo que se desarrolla tomando como enfoque la unión de las dos áreas, es significativo decir que esta combinación a roto algunos paradigmas relacionados con la impresión 3D, como el emplear robots cartesianos que en su mayoría, hacen parte innata del diseño de este tipo de impresoras.

Por otra parte, Colombia se ha caracterizado históricamente por ser un país proveedor de materia prima y consumidor de productos terminados, dentro de los cuales ocupa un gran espacio el campo tecnológico, uno de los problemas que se tiene para competir en este campo es la gran ventaja que han tomado países como Japón que han basado su economía en el desarrollo del conocimiento y la producción de tecnología, pero cuanto más grande sea la demora en incursionar en este campo más grande será la brecha de separación. Hoy en día se cuenta con todo un mar de conocimiento mediante el uso del Internet como herramienta de investigación y comercialización, pero es necesario emplear ese 99 % de transpiración, al que se refería Thomas Alva Edison, en hacer realidad la idea de hacer de Colombia un país proveedor de tecnología.

Este trabajo se justifica en la necesidad del laboratorio de robótica de la ETITC de disponer de un robot paralelo dentro de su inventario, en la necesidad de disposición de información detallada sobre la implementación de la impresión 3D mediante el uso de un robot Delta y por último, en la necesidad como País, de incursionar en el mundo de la producción de tecnología, en este caso tecnología robótica y de impresión 3D, tomando como primer paso el acercamiento y análisis de lo existente, de tal forma que a consecuencia del desarrollo de este primer prototipo sea posible obtener el conocimiento complementario al adquirido en las aulas para así realizar un análisis posterior que posibilite la generación de nuevos portes a estas ramas tecnológicas.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un Robot Delta enfocado a la impresión 3D.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Lograr en el diseño una resolución de capa igual o inferior a $0,5mm$
2. Generar en el diseño un volumen de trabajo mínimo de $15cm^3$
3. Desarrollar una interfaz gráfica amigable e intuitiva con las funciones necesarias para el manejo del prototipo.
4. Demostrar correspondencia entre el diseño teórico y el funcionamiento del prototipo.
5. Proponer acciones que permitan mejorar el mismo.

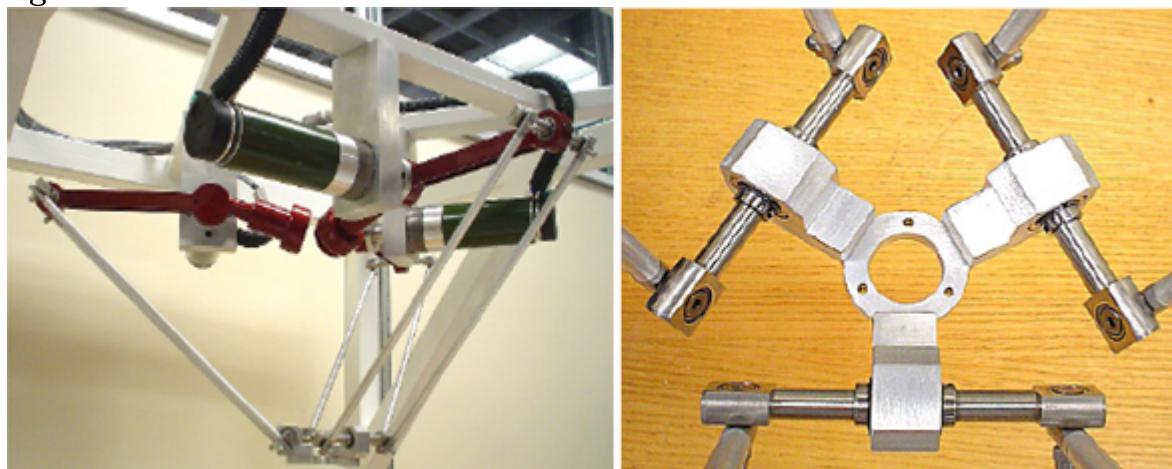
4. MARCO REFERENCIAL

A continuación se hace referencia a algunos trabajos realizados en Colombia y el exterior encaminados al diseño de robots paralelos, en ellos son objeto de estudio temas como: análisis, metodología, optimización, desarrollo y manufactura, brindando así un acercamiento al estado del arte de dichos robots.

4.1. PARALLIX LKF-240

Parallix¹ es un robot desarrollado en el Instituto Politécnico Nacional de México, en este trabajo se muestra el proceso realizado para la construcción de un robot delta tipo 3RSS, éste robot a diferencia del convencional usa articulaciones rotacionales como método para mejorar el espacio de trabajo.

Figura 1. Robot Parallix LKF-240



Fuente: CASTILLO, C.E; VÁZQUEZ, R.A.O; GONZÁLEZ, H. A.

Utiliza como actuadores servomotores con encoder incremental en cuadratura y los materiales seleccionados para su fabricación son aluminio y acero.

Además de realizar el análisis cinemático necesario para la implementación se obtiene como resultado la relación de las dimensiones óptimas, concluyendo que la longitud del

¹CASTILLO, C.E; VÁZQUEZ, R.A.O; GONZÁLEZ, H. A.

brazo representa el doble de la del antebrazo, de la misma manera establece que el radio de la base fija es tres veces el de la base móvil.

Cuenta con un sistema de control PID implementado mediante el uso de tarjetas de control de movimiento tipo PIC-Servo comunicadas por medio de una interface RS485.

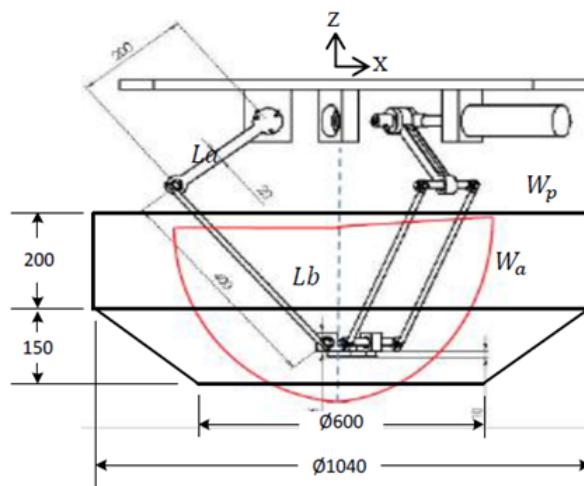
Como complemento al trabajo se realiza un estudio de exactitud, repetibilidad y rigidez mediante el análisis de imágenes.

4.2. METODOLOGÍA DE REDISEÑO DE UN ROBOT PARALELO TIPO DELTA DE 3-GDL EN FUNCIÓN DE UN ESPACIO DE TRABAJO PRESCRITO.

Como se dijo anteriormente, el robot Paralix fue creado con fines educativos, en este trabajo se estableció y desarrolló una metodología de rediseño en busca de obtener los valores de las variables de diseño que permitan la construcción de una versión industrial enfocada al logro de un espacio de trabajo preestablecido².

Su desarrollo se basa en obtener los valores mínimos factibles de las variables de diseño en un universo de soluciones óptimas calculadas mediante el uso de la herramienta Matlab.

Figura 2. Espacio de trabajo deseado



Fuente: BALMACEDA, S. A; CASTAÑEDA C.E.

²BALMACEDA, S. A; CASTAÑEDA C.E.

Básicamente y luego de obtener la ecuación de la Cinemática Inversa, se encuentran los límites geométricos, luego se establece el espacio de trabajo deseado tomando como referencia la geometría característica del mismo obtenida con los robots Delta disponibles y se procede a la búsqueda del universo de soluciones.

Los valores encontrados se obtuvieron a partir de la variación de las dimensiones de las variables mediante un barrido de los valores con base en un rango e incremento definido, además se establece que la longitud del antebrazo debe ser menor a la del brazo a fin de minimizar el torque requerido en los actuadores, y que los valores más críticos en la obtención del espacio de trabajo son los de estas dos variables.

4.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT PARALELO DE ESTRUCTURA 6-RSS

Este trabajo fue desarrollado en conjunto entre la Universidad de las Américas y el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica de México³, en este se propone una solución geométrica de la cinemática inversa, un sistema de ecuaciones no lineales para resolver la cinemática directa y una expresión matemática para definir el espacio de trabajo.

El robot producto del análisis guarda similitud con la conocida plataforma de Stewart, aunque a diferencia de ella emplea articulaciones rotacionales además de las esféricas modificando así sus características de movimiento y método de análisis.

Inicia con el análisis de la geometría del robot que consta de una base y una plataforma hexagonales unidas entre sí por seis brazos compuestos pos dos eslabones cada uno, para lo cual se determina que el sistema coordenado del robot será el mismo de la base.

Para la cinemática directa se propone dar solución al sistema 6x6 de ecuaciones no lineales mediante el método de Newton-Raphson, mientras que para la obtención del espacio de trabajo se usó el algoritmo llamado Poligonización Adaptiva, que consta básicamente de una fase de muestreo burdo y otra de refinamiento adaptivo.

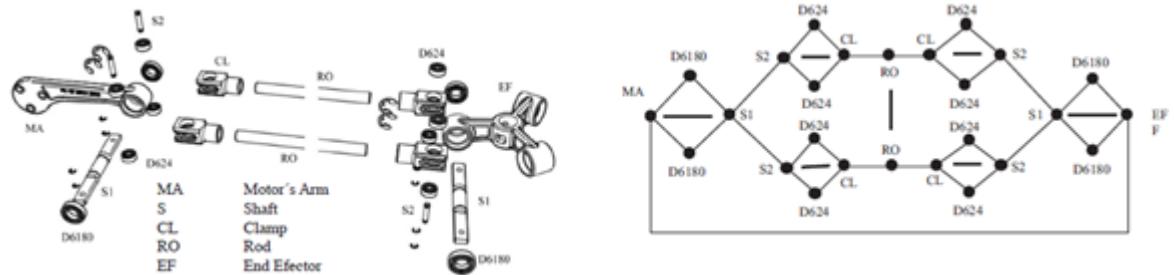
Para la validación de los resultados fue desarrollado un modelo en 3D basado en Java y Open GL controlado por un Joystick que permite simular la plataforma, visualizar la localización de la misma y graficar un volumen tridimensional para cada orientación de la plataforma.

³VÁSQUEZ, J., Et al

4.4. DISEÑO HACIA ENSAMBLE Y MANUFACTURA DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO EXPERIMENTAL TIPO DELTA

Este fue un proyecto realizado en la Universidad Santo Tomás⁴ de Bogotá – Colombia y describe el proceso de diseño de un robot paralelo tipo Delta teniendo como enfoque principal las características a tener en cuenta en el momento del ensamble y manufactura.

Figura 3. Partes y diagrama de uniones



Fuente: GARCÍA, J.A; CÓRDOBA, E.

Parte de un análisis funcional del diseño conceptual y sus características geométricas a fin de determinar aquellas características claves del ensamble, luego divide el robot en subsistemas y partes basado en los principios de diseño vertical, esto a fin de permitir establecer materiales, planos y procesos para llegar a su producción.

Al finalizar se realiza un análisis de ensamblabilidad que determina la mejor secuencia que se debe seguir para la realización del ensamble.

4.5. DISEÑO ÓPTIMO DE UN ROBOT PARALELO CON CONFIGURACIÓN DELTA PARA APLICACIONES EDUCATIVAS

El desarrollo de este proyecto fue realizado con el objetivo de optimizar las dimensiones de un robot Delta experimental para uso en enseñanza⁵, contiene los cálculos de la

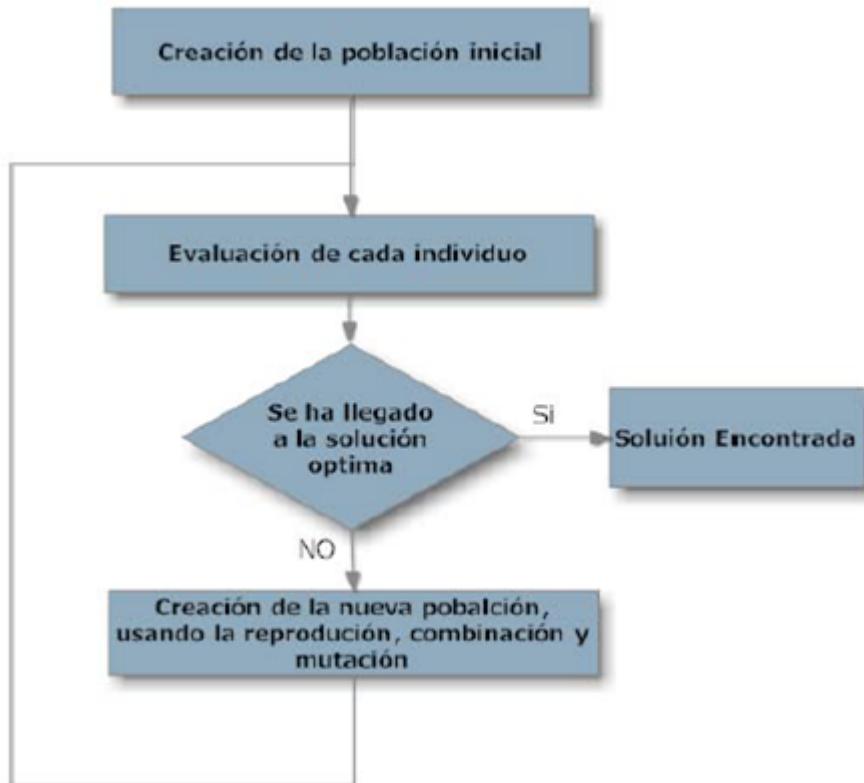
⁴GARCÍA, J.A; CÓRDOBA, E.

⁵MARTÍNEZ, E; PEÑA, C.

cinemática inversa, la obtención del espacio de trabajo y un análisis de interferencias de los eslabones.

Adicionalmente y en cumplimiento de su principal objetivo, desarrolla un proceso de optimización de dimensiones enfocado en obtener el mayor espacio de trabajo posible, dicho proceso es realizado mediante el uso de algoritmos genéticos (GAs) quienes funcionan imitando la adaptación y mutación biológica en el proceso de evolución natural.

Figura 4. Diagrama de flujo GAs



Fuente: MARTÍNEZ, E; PEÑA, C.

Los GAs ofrecen, entre otras, las siguientes bondades:

- Busca una población de soluciones en paralelo.
- La función objetivo y el desempeño requerido determinan la dirección de búsqueda.
- Usa reglas de transición probabilística.
- Genera la posibilidad de seleccionar entre un grupo de soluciones la mas conveniente.

5. MARCO CONCEPTUAL

5.1. ROBOT

De acuerdo a la norma ISO 8373 se define la palabra robot como “Manipulador programable en tres o más ejes, controlado automáticamente, reprogramable y multifuncional, que puede estar fijo en un lugar o móvil para uso en aplicaciones automáticas en la industria.”

Un robot está formado por los siguientes elementos:

Estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales.

5.1.1. Mecánica del robot

La mecánica del robot está conformada básicamente por eslabones y articulaciones, estas últimas, a demás de unir los eslabones, permiten el movimiento relativo de los mismos.

Al estar basados en el análisis de los seres vivos, los robots guardan cierta similitud con ellos, por lo cual es común que sus componentes sean identificados con nombres como cuerpo, brazo, codo, muñeca, entre otros.

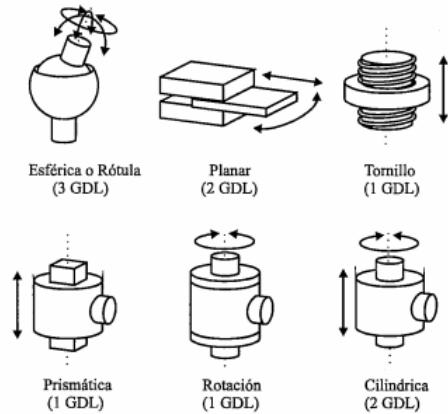
El movimiento de cada articulación (Figura 5)¹ puede ser de desplazamiento, de giro, o de una combinación de ambos, de este modo son posibles seis tipos diferentes de articulaciones.

Se denomina grado de libertad (GDL) a cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior.

El número de grados de libertad se define por la sumatoria de los grados de libertad de las articulaciones que la componen. Es posible emplear diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, lo cual se generan diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación (Barrientos, 2007).

¹(Barrientos, 2007)

Figura 5. Tipos de articulaciones¹



5.1.2. Transmisiones

Las transmisiones, como su nombre lo indica, son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Fueron incluidos, junto con las transmisiones, los elementos encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el robot.

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia, del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento a las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Así mismo las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en movimiento lineal o viceversa.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla una serie de características básicas: debe tener un tamaño y peso reducido, se ha de evitar que se presente juegos u holguras considerables y se deben buscar transmisiones de alto rendimiento, también hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado, y a ser posible entre grandes distancias (Barrientos, 2007).

5.1.3. Actuadores

Los actuadores tienen por misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos. Cada uno de estos presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente.

Las características a considerar son entre otras:

- Potencia
- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Coste

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los robots industriales, dentro de los actuadores eléctricos se encuentran los motores de corriente continua, de corriente alterna, motores paso a paso (Barrientos, 2007).

5.1.4. Sensores

Para conseguir que un robot realice su tarea con adecuada precisión, velocidad e inteligencia, será preciso que tenga conocimiento tanto de su propio estado como el estado del entorno. La información relacionada con su estado (fundamentalmente la posición de sus articulaciones) la consigue en los denominados sensores internos, mientras que los de entorno adquieren con los externos (Barrientos, 2007).

Algunos tipos de sensores son:

- Presencia: Inductivo, capacitivo, efecto hall, célula reed, óptico, ultrasonido, contacto.
- Posición • Analógicos: Potenciómetros, resolver, sincro, LVDT, inductosyn.
- Digitales: Encoders absolutos, encoders incrementales y regla óptica.
- Velocidad: Tacogeneratriz.

5.1.5. Elementos Terminales

Los elementos terminales, también llamados efectores finales son los encargados de interactuar directamente con el entorno del robot, pueden ser de aprehensión o herramientas. Si bien un mismo robot industrial es, dentro de unos límites lógicos, versátil y readaptable a una gran variedad de aplicaciones, no ocurre así con los elementos terminales, que son en muchos casos diseñados para cada tipo de trabajo, se deben clasificar teniendo en cuenta si se trata de un elemento de sujeción o de un herramienta.

Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener objetos y, suelen denominarse pinzas. Se distingue entre las que utilizan dispositivos de agarre mecánico y las que utilizan algún otro tipo de dispositivo (ventosas, pinzas adhesivas, ganchos, etc). En la elección o diseño de una pinza se han de tener en cuenta diversos factores. Entre los que afectan al tipo de objeto y de manipulación a realizar destacan el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza que es necesario ejercer y mantener para sujetarlo. Entre los parámetros de la pinza cabe destacar su peso, el equipo de accionamiento y la capacidad de control (Barrientos, 2007).

Al ser posible el manejo de herramientas como elemento terminal, en el caso de la impresión 3D se usa un extrusor que va aportando el material necesario a medida que el robot realiza la trayectoria.

5.1.6. Localización Espacial

La manipulación de piezas llevada a cabo por un robot implica el movimiento espacial de su extremo. Así mismo para que el robot pueda recoger una pieza, es necesario conocer su posición y orientación de esta con respecto a la base del robot. Para localizar un cuerpo rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita la localización espacial de sus puntos. En un plano el posicionamiento tiene dos grados de libertad, y por tanto la posición de un punto vendrá definida por dos componentes independientes. En el caso de un espacio tridimensional será necesario emplear tres componentes.

La forma más intuitiva y utilizada de especificar la posición son coordenadas cartesianas aunque también existen otros métodos, igualmente válidos, y también ampliamente extendidos, como son coordenadas polares para dos dimensiones, cilíndricas y esféricas para espacios tridimensionales (Barrientos, 2007).

5.1.7. Cinemática del robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función de tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema de la cinemática directa, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.

5.1.7.1. Cinemática Directa

Dado que un robot se puede considerar como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema de referencias fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia.

De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar tres ecuaciones que relacionen la posición de la plataforma móvil con los ángulos de sus eslabones para luego solucionar el sistema por medio de métodos numéricos iterativos o de manera algebraica (Barrientos, 2007).

5.1.7.2. Cinemática Inversa

El segundo, denominado el problema de la cinemática inversa, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

El problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ para que se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Así como es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas e independientemente de la configuración de robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso,

siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot.

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo.

Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para describir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose todo al problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4x4 que relacione la localización espacial del extremo del robot con respecto al sistema de coordenadas de su base (Fu, et al., 1988)

Por otra parte, la cinemática del robot trata también de encontrar las relaciones entre las velocidades del movimiento de las articulaciones y de las del extremo. Esta relación viene dada por el modelo diferencial expresado mediante la matriz Jacobiana (Barrientos, 2007).

5.1.7.3. Configuraciones Singulares

Se denominan configuraciones singulares de un robot a aquellas en las que el determinante de la matriz Jacobiana se anula. Por esta circunstancia, en las configuraciones singulares no existe Jacobiana inversa. Al anularse el Jacobiano, un incremento infinitesimal de las coordenadas cartesianas supondría un incremento infinito de las coordenadas articulares, lo que en la práctica se traduce en que en las inmediaciones de las configuraciones singulares, el pretender que el extremo del robot se mueva a velocidad constante, obligaría a movimientos de las articulaciones a velocidades inabordables por sus actuadores. Por ello, en las inmediaciones de las configuraciones singulares se pierde algunos de los grados de libertad del robot, siendo imposible que su extremo se mueva en una determinada dirección cartesiana.

Las diferentes configuraciones singulares del robot pueden ser clasificadas como:

Singularidades en los límites del espacio del trabajo del robot. Se presentan cuando en el extremo del robot está en algún punto límite de trabajo interior o exterior. En esta situación resulta obvio que el robot no podrá desplazarse en las direcciones que lo alejan de ese espacio de trabajo.

Singularidades en el interior del espacio de trabajo del robot. Ocurren dentro de la zona de trabajo y se producen generalmente por el alineamiento de dos o más ejes de las articulaciones del robot (Barrientos, 2007).

5.2. ROBOT DELTA

Figura 6. Robot Delta Final



Fuente: Los autores

Un robot paralelo (robot de cadena cinemática cerrada), es todo aquel robot cuyo efecto final, con n grados de libertad, se encuentra unido a la base por más de una cadena cinemática independiente. Esta condición hace que los manipuladores paralelos tengan una mayor rigidez (estabilidad estructural), puedan trabajar a mayor velocidad, mayor relación carga/peso y cuenten con más precisión que los robots de cadena abierta o seriales, que son los más comunes en la industria y en la academia.

Sin embargo, los robots paralelos tienen una estructura más elaborada y por tanto, requieren de un análisis cinemático, un diseño, y unos esquemas de control de mayor complejidad; lo cual sumado al limitado espacio de trabajo, genera un freno en el desarrollo temprano de los sistemas paralelos.

En los últimos años el uso de las computadoras y el desarrollo de nuevas técnicas de análisis han permitido el redescubrimiento y aplicación de los sistemas robóticos paralelos, es así que en la actualidad existe una gran cantidad de estructuras paralelas, las más comunes van de dos a seis grados de libertad originando un campo muy diverso de aplicaciones especialmente para posicionamiento, como en telescopios, simuladores de vuelo y de conducción; así mismo, se han desarrollado aplicaciones para los procesos de manufactura de alta velocidad, y en la industria de alimentos (en el área de empacado) se cuenta con los robots tipo Delta y otras plataformas, usadas para rehabilitación como la plataforma Motek.

Los robots tipo delta fueron propuestos por Clavel (1986) y su publicación se realizó en 1989. La principal característica es que sus tres grados de libertad son lineales. El estudio de estos robots se ha concentrado en la solución de los problemas asociados con el cálculo de la cinemática, a través de la formulación algebraica y numérica, eliminación algebraica, el enfoque básico Groebner, que buscan encontrar las raíces de los polinomios o solucionar las ecuaciones no lineales, otros enfoques en este sentido han llevado a la aplicación de la inteligencia artificial, así como el uso de sensores auxiliares para facilitar la solución de la cinemática.

En cuanto al diseño de este tipo de robots los estudios apuntan a la optimización de las dimensiones del robot, para mejorar su desempeño y maximizar el espacio de trabajo y optimizar el diseño por análisis de la rigidez global

En Colombia se han realizado estudios relacionados con la estructura, el análisis y el control de robots paralelos. Los robots delta están siendo aplicados a nivel industrial como manipuladores en líneas de empacado de alta velocidad por compañías como Bosch, ADEPT, ABB Robotics, entre otras.

El desarrollo actual de los robots paralelos y específicamente del tipo delta, hace necesario el estudio, análisis y enseñanza de este tipo de manipuladores en las universidades colombianas, con el fin de aumentar la competitividad de los profesionales de las áreas de ingeniería mecatrónica, mecánica, electrónica y afines (Martínez, et al., 2010)

5.3. IMPRESORAS 3D

Una impresora 3D es una máquina capaz de realizar "impresiones" de diseños en 3D, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por computador.

Surgen con la idea de convertir archivos de 2d en prototipos reales o 3D En la actualidad son utilizados para la matrizería o la prefabricación de piezas o componentes, en sectores como la arquitectura y el diseño industrial resulta más común es el de las prótesis médicas, donde resultan ideales dada la facilidad para adaptar cada pieza fabricada a las características exactas de cada paciente.

5.3.1. Tipos de Impresión

5.3.1.1. Estereolitografía

Fue el primer método concebido. Consiste en la aplicación de un láser ultravioleta a una resina sensible a la luz contenida en un cubo. El láser va solidificando la resina en capas hasta que el objeto adquiere la forma deseada.

5.3.1.2. Impresión por láser

Más conocido por su nombre en inglés (selective laser sintering o SLS), este método consiste en la compactación del material con el que se quiere construir el objeto - material que se encontrará pulverizado a una temperatura próxima a la fundición- a través de la aplicación de un láser.

5.3.1.3. Impresión por inyección

Muy similar a la tecnología de impresión por láser, su diferencia con ésta radica en que, en lugar de emplear un láser, el material que estará en las mismas condiciones que en la tecnología por SLS, es decir, en polvo y a una temperatura cercana a la fundición- se compactará mediante inyección de un aglomerante (tinta). Esta tecnología permite imprimir en color, ya que el aglomerante utilizado puede tener un color u otro.

5.3.1.4. Impresión por deposición de material fundido

Este método consiste en la expulsión por parte de la máquina de un material fundido sobre un espacio plano. El material deberá ser expelido en hilos minúsculos para poder solidificarse nada más caer a la superficie. En este tipo de impresión se cuenta con un extrusor que se irá moviendo para que el material sólido vaya tomando la forma de cada

capa, hala el filamento de plástico por un lado y deposita un hilo de plástico fundido, con el que se va construyendo la pieza.

Está dividido en dos partes: El cuerpo y el extremo caliente (hot-end). El hot-end es donde está la resistencia de potencia y el termistor, y es donde se funde el plástico. Existen muchos tipos de hot-ends. Los más usados son: Budaschnozzle 1.1 y J-head pero existen muchos más. El plástico fundido sale por la aguja, que puede tener diámetros comprendidos entre 0.5 y 0.2 mm. El cuerpo es la parte que ejerce la tracción sobre el plástico. Incluye un motor paso a paso y unos engranajes que mueven un tornillo con unas muescas (hobbed bolt) que engancha el filamento de plástico y lo empuja hacia el hot-end ²

²Disponible en internet: <http://www.hetrevistadigital.com.ar/2014/05/impresoras-3d-que-son.html>

6. ALCANCE Y LIMITACIONES

Este proyecto de grado está delimitado por una serie de factores y su trascendencia se verá reflejada a lo largo del tiempo de ejecución planeado, el principal objetivo habla del diseño y construcción de un robot tipo Delta enfocado a la impresión 3D, pero éste encare tiene un auge que no llegará a la aplicación dí la impresión 3d, no obstante la brecha que resultará entre el prototipo del robot Delta construido y una impresora 3D será bastante corta y podrá ser objetivo general tal vez de un proyecto subsecuente, a continuación se especifican los alcances y las delimitaciones que definen éste proyecto:

6.1. ALCANCES

- El diseño y construcción del prototipo del robot Delta va a estar sujeto a una aplicación de impresión 3D.
- El robot será un prototipo mecatrónico capaz de recibir órdenes y ejecutar operaciones.
- La interfaz de usuario será desarrollada como ejecutable, de manera que no requiera tener instalado el software Matlab para el uso del robot.
- Se dejará el proyecto como una base para complementar con un sistema de extrusión de plástico, otro tipo de material u otro tipo de aplicación.
- Se hará entrega formal del prototipo al laboratorio de robótica de la ETITC para su administración y cuidado.

6.2. LIMITACIONES

- El prototipo del robot se enfocará exclusivamente a generar trayectorias, mas no contará con el sistema de impresión.
- Debido a los altos costos, la construcción del prototipo se realizará con motores de menor resolución al los calculados, pero se garantiza la generación de las trayectorias aunque se vea afectada su resolución.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

Este proyecto se puede catalogar como un proyecto de investigación y transferencia de tecnologías mecatrónicas, porque el conocimiento que se va a desarrollar e implementar no es nuevo para la humanidad, los robots paralelos llevan un considerable tiempo en desarrollo y están vinculados a una gran cantidad de aplicaciones industriales, entre ellas la impresión 3d, por otro lado el enfoque que se plantea para el diseño y la construcción no es desconocido por la industria, innumerables desarrollos y modelos de impresoras se patentan con gran frecuencia, por aquello de la prevista revolución industrial con estas máquinas.

La metodología de éste proyecto se encaminó hacia la investigación y adquisición de nuevos conocimientos, además de la aplicación de estos en el diseño y construcción de un prototipo; para su desarrollo fue necesario plantear procedimientos de apoyo, estableciendo las actividades necesarias para desarrollar el proyecto, los medios con los que se contaba para cumplir todas las tareas que se plantearon y las herramientas para realizar actividades especiales.

7.1. ACTIVIDADES A REALIZAR

1. Definición de las características del prototipo.
2. Recopilación de información.
3. Diseño del modelo cinemático directo e inverso del robot.
4. Diseño del modelo mecánico.
5. Diseño del modelo electrónico.
6. Simulación del modelamiento aplicando los diseños previos.
7. Construcción el prototipo del robot.
8. Desarrollo de la interfaz grafica.
9. Puesta a punto del robot.
10. Generación del documento final.

7.1.1. Definición de las características del prototipo.

1. Definir el funcionamiento.
2. Definir el modo de operación.
3. Definir las especificaciones técnicas.
4. Definir el volumen de trabajo.
5. Definir el modelo físico.
6. Hacer un pre-diseño del prototipo.

7.1.2. Recopilación de información.

1. Consulta por diferentes medios a cerca de la evolución y estado actual de los robots tipo Delta y la impresión 3D
2. Investigar diferentes modelos y métodos de diseño del robot Delta.
3. Obtener información referente a las características necesarias del robot para realizar impresión 3D.

7.1.3. Diseño del modelo cinemático directo e inverso del robot.

1. Diseñar el modelo cinemático inverso del robot Delta.
2. Diseñar el modelo cinemático directo del robot Delta.
3. Buscar asistencia técnica que permita corroborar la veracidad de los resultados (Docente y/o Software).

7.1.4. Diseño del modelo mecánico.

1. Definir el sistema mecánico.
2. Realizar cálculos del sistema mecánico.
3. Realizar simulaciones del sistema mecánico según las especificaciones técnicas definidas para el prototipo del robot Delta.

4. Realizar los planos del sistema mecánico definido.
5. Definir los materiales que se deben emplear para la construcción del sistema mecánico.

7.1.5. Diseño electrónico

1. Definir el sistema electrónico.
2. Realizar cálculos del sistema electrónico.
3. Realizar los planos del sistema electrónico definido.
4. Definir los materiales que se deben emplear para la construcción del sistema electrónico.

7.1.6. Simulación del modelamiento aplicando los diseños previos.

1. Definir las herramientas que permitirán hacer una simulación simultanea de los sistemas.
2. Realizar las simulaciones y pruebas pertinentes según las especificaciones técnicas definidas para el prototipo del robot Delta.
3. Documentar los resultados.
4. Aplicar correctivos si es necesario.

7.1.7. Construcción el prototipo del robot.

Definir las piezas que necesitan mano de obra por un tercero (mecanizados especiales, soldaduras, laminados, entre otros).

Buscar los proveedores de confianza que van proveer los materiales para la construcción del sistema mecánico.

Buscar los proveedores de confianza que van realizar el trabajo de la piezas especiales.

Realizar dos cotizaciones si es posible de la lista de materiales que son comerciales.

Realizar dos cotizaciones si es posible de la lista de materiales que son no comerciales (necesitan mano de obra por un tercero).

Destinar el presupuesto necesario para la adquisición de todos los componentes del sistema mecánico.

Realizar la gestión de adquisición de los materiales.

Definir las herramientas que se necesitan para la construcción del sistema mecánico, maquinaria, mano de obra corriente, mano de obra calificada.

Destinar el presupuesto necesario para la adquisición de las herramientas.

Realizar la gestión de adquisición las herramientas.

Ejecutar la construcción del sistema mecánico del prototipo del robot Delta

Construir el modelo electrónico definido para el prototipo del robot Delta.

Concatenar el sistema mecánico con el sistema electrónico.

Realizar pruebas de movilidad.

Verificar el correcto ensamblaje de todos los componentes en conjunto (electrónica-mecánica).

Realizar pruebas de conexión y sincronismo.

7.1.8. Puesta a punto del robot.

A. Ajustar los componentes mecánicos y electrónicos que lo requieran (sistemas de lubricación, fuentes de energía, entre otros).

B. Ajustar el prototipo del robot delta, llevándolo a las especificaciones técnicas definidas.

C. Realizar pruebas y concluir el funcionamiento.

D. Definir si existe algún aspecto por retocar.

E. Redefinir los aspectos anteriores.

7.1.9. Entrega documento final.

A. Realizar el manual de usuario.

B. Realizar una guía de mantenimiento y posibles fallas.

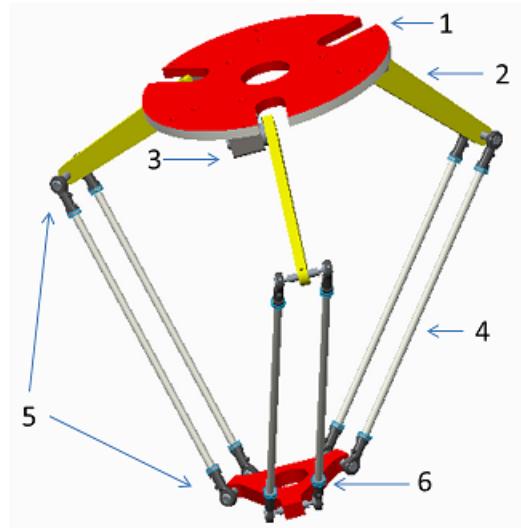
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se evidencia detalladamente el trabajo realizado por los autores a fin de dar cumplimiento a los objetivos fijados.

8.1. ARQUITECTURA DEL ROBOT

Realizar el análisis geométrico del robot es en punto de partida hacia la determinación del modelo cinemático del robot, para comenzar es necesario identificar las partes que lo componen y sus características básicas.

Figura 7. Partes del robot

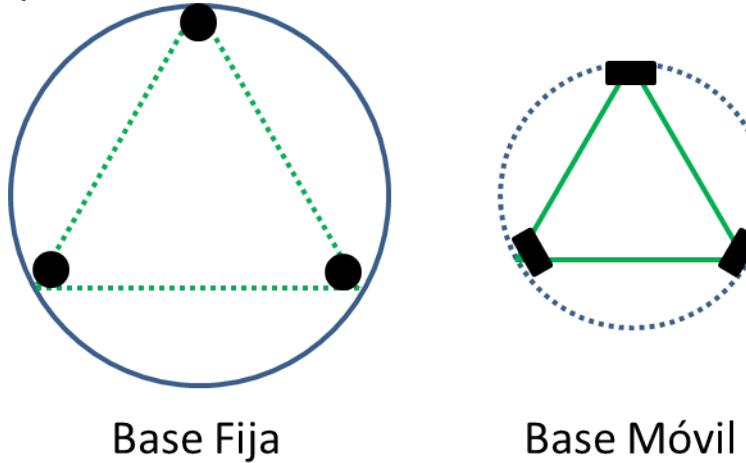


1. Base fija.
2. Eslabón superior.
3. Servomotor.
4. Eslabón inferior.
5. Rotulas.
6. Plataforma móvil.

Fuente: Los autores

La base fija es quien soporta los motores, estos a su vez están distribuidos uniformemente dentro de una circunferencia con una separación entre sí de 120 grados y formando un triángulo equilátero entre ellos, de igual manera la plataforma móvil contiene los ejes a los cuales se fijarán los eslabones conformando un triángulo equilátero de menor tamaño al de la base.

Figura 8. Base y Plataforma



Fuente: Los autores

La base fija y la móvil están conectadas entre ellas por tres cadenas cinemáticas de dos eslabones unidos entre sí por medio de una conexión esférica (Rótula “R”).

Las conexiones a la base fija se realizan ensamblando directamente los eslabones a los motores (conexión rotacional “S”), mientras que las empleadas para unirlos a la base móvil son de tipo esférico, por lo cual el robot se define como (3RSS).

8.1.1. Determinación de grados de libertad (GDL)

Los grados de libertad de un mecanismo son el número de entradas necesarias para especificar la configuración del mecanismo, se pueden determinar con la aplicación de la fórmula de Chebyshov Grübler Kutzbach.

$$GDL = \lambda(b - g - 1) + \sum_k f_k$$

Siendo:

λ = constante.

b = número de cuerpos rígidos del mecanismo.

g = número de articulaciones del mecanismo.

f_k = grados de libertad de las articulaciones.

λ = 3 para mecanismos planares, 6 para espaciales.

$$b = 6\text{eslabones} + 1\text{base} + 1\text{plataforma} = 8$$

$$g = 3\text{rotacionales} + 6\text{esféricas} = 9$$

$$f_k = 1\text{pararotacional}, 2\text{paraesférica} = (3 \times 1) + (6 \times 2) = 15$$

$$\text{Entonces: } GDL = 6(8 - 9 - 1) + 15 = 3$$

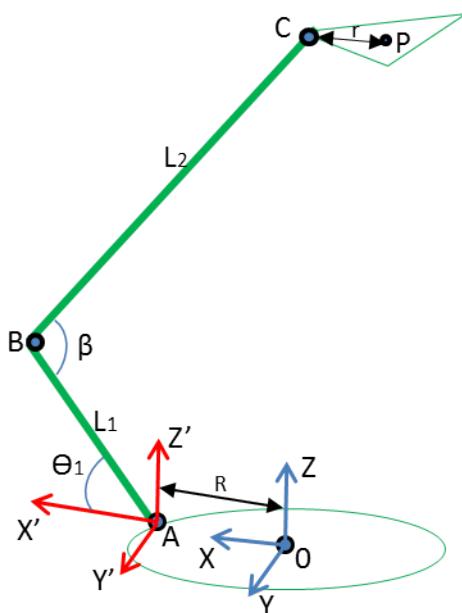
De esta forma determinamos que el robot cuenta con 3 grados de libertad.

8.2. ANÁLISIS GEOMÉTRICO

Analizar la geometría del robot permite relacionar los grados de libertad (las variables generalizadas) con las coordenadas cartesianas de todos y cada uno de los puntos que constituyen el robot, de tal forma que logremos expresar los vectores que intervienen en el sistema en términos de las variables del mismo.

Como el sistema consta de tres cadenas cinemáticas idénticas solo es necesario realizar el procedimiento analítico a una de ellas; por practicidad el sistema de referencia XYZ se ubica en el centro de la base fija, el eje X en dirección a la cadena cinemática a analizar y el eje Z de forma perpendicular a la base.

Figura 9. Geometria del Robot



Fuente: Los autores

Datos del sistema:

L_1, L_2 = Eslabones de la cadena cinemática (CC).

A, B, C = Articulaciones.

ϑ_i = Angulo formado entre el X' y L_1

G_2 = Angulo formado entre la proyección de \overrightarrow{AB} y \overrightarrow{BC} .

M_3 = Angulo formado entre el Y' y \overrightarrow{BC} .

β = Angulo formado entre L_1 y L_2 .

P = Posición del centro de la plataforma móvil $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$

R = Distancia entra 0 y A.

r = Distancia entre P y C.

α = Angulo formado entre X y X'.

Siendo CC = i; tenemos 3 CC ($i=1, 2, 3$) y $(\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3)$ para cada i, entonces contamos con 9 ángulos articulares en el sistema.

Como se puede apreciar el sistema AX'Y'Z' con respecto al de referencia 0XYZ, está trasladado una distancia R a lo largo de 0X, también existe una rotación α entorno a 0Z.

El interés de este procedimiento se encuentra en conocer los vectores $\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC}, \overrightarrow{BA}, \overrightarrow{BC}$ y \overrightarrow{AC} para lo cual se hace uso de la aplicación de matrices de transformación homogénea.

Una matriz de transformación homogénea T se define como una matriz de dimensión 4x4 que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro, dicha matriz se compone de cuatro submatrices de distinto tamaño que representan la rotación, traslación, perspectiva y escalado gobal.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (1)$$

En robótica solo nos interesa la rotación y la traslación, por lo cual consideramos la perspectiva como nula y el escalado como la unidad, quedando la matriz T de la siguiente forma:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

La siguiente matriz nos permite conocer las coordenadas del vector $r = (r_x, r_y, r_z)$ en el sistema 0XYZ a partir de sus coordenadas $(r'_{x'}, r'_{y'}, r'_{z'})$ en el sistema 0X'Y'Z'

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} r'_{x'} \\ r'_{y'} \\ r'_{z'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por practicidad en el desarrollo de las operaciones se toma $s = \sin$ y $c = \cos$.

Para el caso de realizar una traslación seguida de un rotación α sobre el eje 0Z del sistema 0XYZ, la matriz homogénea resultante es la siguiente:

$$T(P, (Z, \alpha)) = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 & x\alpha - ys\alpha \\ s\alpha & c\alpha & 0 & xs\alpha + y\alpha \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Si se reemplaza (4) en (3) el resultado será la obtención de los vectores $\overrightarrow{0A}$, $\overrightarrow{0B}$, $\overrightarrow{0C}$, \overrightarrow{BA} , \overrightarrow{BC} y \overrightarrow{AC} . Se usa el subíndice i haciendo referencia a la existencia de las 3 CC, de forma que $i = (1, 2, 3)$.

$$\overrightarrow{0A_i} = \begin{bmatrix} c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 & x\alpha_i - R\alpha_i \\ s\alpha_i & c\alpha_i & 0 & xs\alpha_i + R\alpha_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\alpha_i \\ R\alpha_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\overrightarrow{0B_i} = \begin{bmatrix} c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 & x\alpha_i - R\alpha_i \\ s\alpha_i & c\alpha_i & 0 & xs\alpha_i + R\alpha_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1c\vartheta_{1i} \\ 0 \\ L_1s\vartheta_{1i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i}) \\ s\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i}) \\ L_1s\vartheta_{1i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\overrightarrow{0C_i} = \begin{bmatrix} c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 & x\alpha_i - R\alpha_i \\ s\alpha_i & c\alpha_i & 0 & xs\alpha_i + R\alpha_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x\alpha_i + P_y s\alpha_i + r - R \\ P_y\alpha_i - P_x s\alpha_i \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + r\alpha_i \\ P_y + r\alpha_i \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\overrightarrow{BA_i} = \begin{bmatrix} R\alpha_i \\ R\alpha_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i}) \\ s\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i}) \\ L_1s\vartheta_{1i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c\alpha_iL_1c\vartheta_{1i} \\ -s\alpha_iL_1c\vartheta_{1i} \\ -L_1s\vartheta_{1i} \\ \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\overrightarrow{BC_i} = \begin{bmatrix} P_x + r\alpha_i \\ P_y + r\alpha_i \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i}) \\ s\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i}) \\ L_1s\vartheta_{1i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x - c\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i} - r) \\ P_y - s\alpha_i(R + L_1c\vartheta_{1i} - r) \\ P_z - L_1s\vartheta_{1i} \\ \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\overrightarrow{AC_i} = \begin{bmatrix} P_x + r\alpha_i \\ P_y + r\alpha_i \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R\alpha_i \\ R\alpha_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_x + c\alpha_i(r - R) \\ P_y + s\alpha_i(r - R) \\ P_z \\ \end{bmatrix} \quad (10)$$

8.3. MODELO CINEMÁTICO

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y orientación del extremo final del robot y los valores que toman sus coordenadas articulares.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot, uno es el que se conoce como el problema cinemático inverso, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas; el segundo, denominado problema cinemático directo, que consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.

Se debe recordar que para este caso el extremo final del robot es el centro de la plataforma móvil y que es posible analizar cada CC de manera independiente gracias a la configuración simétrica que posee el robot.¹

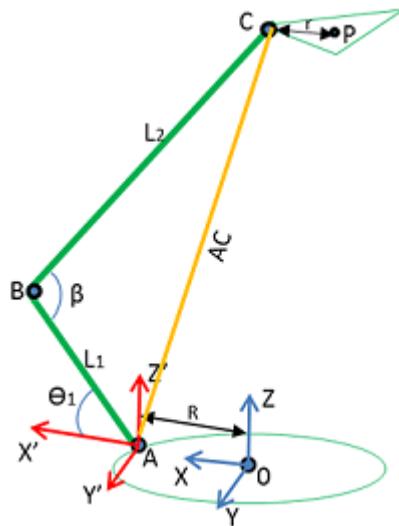
¹Disponible en internet: <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r91/r91.htm>

8.3.1. Modelo Cinemático Inverso

Como ya se había explicado anteriormente el uso de ésta cinemática pretende encontrar el ángulo ϑ_1 que debe girar cada uno de los motores para ubicar el centro de la plataforma móvil en la posición deseada.

Para iniciar, los vértices $A_i B_i C_i$ forman un triángulo del cual es posible hallar, usando el teorema del coseno, la magnitud del vector $\overrightarrow{A_i C_i}$.

Figura 10. Triángulo ABC



Fuente: Los autores

Como $(A_i C_i)^2 = (L_1)^2 + (L_2)^2 - 2L_1 L_2 \cos\beta_i$, siendo $\cos\beta_i$ la única incognita, es posible hacer uso de la definición del producto escalar (DPE) para hallarla.

De acuerdo a la (DPE) se tiene que $\overrightarrow{B_i A_i} \cdot \overrightarrow{B_i C_i} = (B_i A_i)(B_i C_i) \cos\beta_i$ y teniendo en cuenta que $L_1 = B_i A_i$ y que $L_2 = B_i C_i$, se tiene:

$$\cos\beta_i = \left(\frac{\overrightarrow{B_i A_i} \cdot \overrightarrow{B_i C_i}}{L_1 L_2} \right), \text{ que al ser reemplazado en el teoréma del coseno como:}$$

$$(A_i C_i)^2 = (L_1)^2 + (L_2)^2 - 2L_1 L_2 \left(\frac{\overrightarrow{B_i A_i} \cdot \overrightarrow{B_i C_i}}{L_1 L_2} \right) \text{ se obtiene que:}$$

$$(A_i C_i)^2 = (L_1)^2 + (L_2)^2 - 2 \overrightarrow{B_i A_i} \cdot \overrightarrow{B_i C_i}$$

$$\text{Si } \overrightarrow{B_i A_i} \cdot \overrightarrow{B_i C_i} = (L_1)^2 - L_1 c \vartheta_i (P_x c \alpha_i + P_y s \alpha_i + r - R) - L_1 s \vartheta_i P_z$$

Entonces:

$$(A_i C_i)^2 = (L_2)^2 - (L_1)^2 + 2L_1 c\vartheta_i (P_x c\alpha_i + P_y s\alpha_i + r - R) - 2L_1 s\vartheta_i P_z$$

Hallando la magnitud del vector $\overrightarrow{AC_i}$ se tiene que: $(A_i C_i)^2 = (P_x c\alpha_i (r - R))^2 + (P_y s\alpha_i (r - R))^2 + P_z^2$

Entonces:

$$\left((L_2)^2 - (L_1)^2 + 2L_1 c\vartheta_i (P_x c\alpha_i + P_y s\alpha_i + r - R) - 2L_1 s\vartheta_i P_z \right) = \left((P_x c\alpha_i (r - R))^2 + (P_y s\alpha_i (r - R))^2 + P_z^2 \right)$$

Resolviendo tenemos que:

$$(2L_1 P_z) s\vartheta_i + (2L_1 (P_x c\alpha_i + P_y s\alpha_i + r - R)) c\vartheta_i = \left((P_x c\alpha_i (r - R))^2 + (P_y s\alpha_i (r - R))^2 + P_z^2 + L_1^2 - L_2^2 \right)$$

Como se puede apreciar, la anterior ecuación es de la forma $a_i s\vartheta_{1i} + b_i c\vartheta_{1i} = c_i$ y es posible reescribirla de acuerdo a la identidad trigonométrica de suma de senos y cosenos, de manera que se obtiene la ecuación general de la cinemática inversa, quedando de la siguiente forma:

$$\vartheta_i = \sin^{-1} \left(\frac{c c_i}{\sqrt{c a_i^2 + c b_i^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{c b_i}{c a_i} \right)$$

Donde las variables son:

$$ca_i = 2L_1 P_z$$

$$cb_i = 2L_1 (P_x c\alpha_i + P_y s\alpha_i + r - R)$$

$$cc_i = (P_x c\alpha_i (r - R))^2 + (P_y s\alpha_i (r - R))^2 + P_z^2 + L_1^2 - L_2^2$$

Ahora, para encontrar los valores de ϑ_{1i} que debe rotar cada actuador solo es necesario reemplazar $i = (1, 2, 3)$ y $\alpha_i = (0, 120, 240)$ respectivamente, donde las variables serían:

Para ϑ_1

$$ca_1 = 2L_1 P_z$$

$$cb_1 = 2L_1 (P_x + r - R)$$

$$cc_1 = (P_x + r - R)^2 + P_y^2 + P_z^2 + L_1^2 - L_2^2$$

Para ϑ_2

$$ca_2 = 2L_1 P_z$$

$$cb_2 = L_1 \left(-P_x + \sqrt{3}P_y + 2r - 2R \right)$$

$$cc_2 = \left(P_x - \frac{1}{2}(r - R) \right)^2 + \left(P_y - \frac{\sqrt{3}}{2}(r - R) \right)^2 + P_z^2 + L_1^2 - L_2^2$$

Para ϑ_3

$$ca_3 = 2L_1 P_z$$

$$cb_3 = L_1 \left(-2P_x - \sqrt{3}P_y + 2r - 2R \right)$$

$$cc_3 = \left(P_x - \frac{1}{2}(r - R) \right)^2 + \left(P_y - \frac{\sqrt{3}}{2}(r - R) \right)^2 + P_z^2 + L_1^2 - L_2^2$$

8.3.2. Modelo Cinemático Directo

En el análisis geométrico resuelto anteriormente, se definió que la magnitud de L2 era igual a la magnitud del vector $\overrightarrow{BC_i}$ cuyo valor es:

$$L2 = (P_x - c\alpha_i(R + L_1c\vartheta_i - r))^2 + (P_y - s\alpha_i(R + L_1c\vartheta_i - r))^2 + (P_z - L_1s\vartheta_i)^2$$

De esta ecuación, y teniendo en cuenta que $\alpha_i = (0, 120, 240)$, es posible relacionar la posición de la plataforma móvil con las variables de las articulaciones por medio del siguiente sistema de tres ecuaciones no lineales.

$$E_1 = (P_x - R - L_1c\vartheta_1 + r)^2 + (P_y)^2 + (P_z - L_1s\vartheta_1)^2 - (L_2)^2$$

$$E_2 = \left(P_x - \frac{1}{2}(R + L_1c\vartheta_2 - r) \right)^2 + \left(P_y - \frac{\sqrt{3}}{2}(R + L_1c\vartheta_2 - r) \right)^2 + (P_z - L_1s\vartheta_2)^2 - (L_2)^2$$

$$E_3 = \left(P_x - \frac{1}{2}(R + L_1c\vartheta_3 - r) \right)^2 + \left(P_y - \frac{\sqrt{3}}{2}(R + L_1c\vartheta_3 - r) \right)^2 + (P_z - L_1s\vartheta_3)^2 - (L_2)^2$$

Para facilitar la comprensión y solución del sistema es posible reescribir las ecuaciones de la siguiente forma:

$$E_1 = (P_x)^2 + 2a_1 P_x + (P_y)^2 + (P_z)^2 - 2a_2 P_z - a_3$$

$$E_2 = (P_x)^2 + b_1 P_x + (P_y)^2 - \sqrt{3}b_1 P_y + (P_z)^2 - 2b_2 P_z - b_3$$

$$E_3 = (P_x)^2 + c_1 P_x + (P_y)^2 - \sqrt{3}c_1 P_y + (P_z)^2 - 2c_2 P_z - c_3$$

Siendo:

$$a_1 = -R - L_1c\vartheta_1 + r$$

$$a_2 = L_1s\vartheta_1$$

$$a_3 = (L_2)^2 - (a_1)^2 - (a_2)^2$$

$$b_1 = R + L_1c\vartheta_2 - r$$

$$b_2 = L_1s\vartheta_2$$

$$b_3 = (L_2)^2 - (b_1)^2 - (b_2)^2$$

$$c_1 = R + L_1 c \vartheta_3 - r$$

$$c_2 = L_1 s \vartheta_3$$

$$c_3 = (L_2)^2 - (c_1)^2 - (c_2)^2$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se encuentra que:

$$P_x = g - h P_z , P_y = \frac{d+eP_z}{f} \text{ y } P_z = \frac{-m+\sqrt{m^2-4nl}}{2l}$$

Siendo:

$$d = \frac{a_3-b_3}{2a_1-b_1} - \frac{a_3-c_3}{2a_1-c_1}$$

$$e = \frac{2(c_2-a_2)}{2a_1-c_1} - \frac{2(b_2-a_2)}{2a_1-b_1}$$

$$f = \frac{\sqrt{3}b_1}{2a_1-b_1} + \frac{\sqrt{3}c_1}{2a_1-c_1}$$

$$g = \frac{a_3-b_3}{2a_1-b_1} - \frac{\sqrt{3}b_1 d}{c(2a_1-b_1)}$$

$$h = \frac{2(b_2-a_2)}{2a_1-b_1} - \frac{\sqrt{3}b_1 e}{c(2a_1-b_1)}$$

$$l = h^2 + \left(\frac{e}{f}\right)^2 + 1$$

$$m = 2 \left(\frac{de}{f^2} - gh - a_1 h - a_2 \right)$$

$$n = g^2 + \left(\frac{d}{f}\right)^2 + 2a_1 g - a_3$$

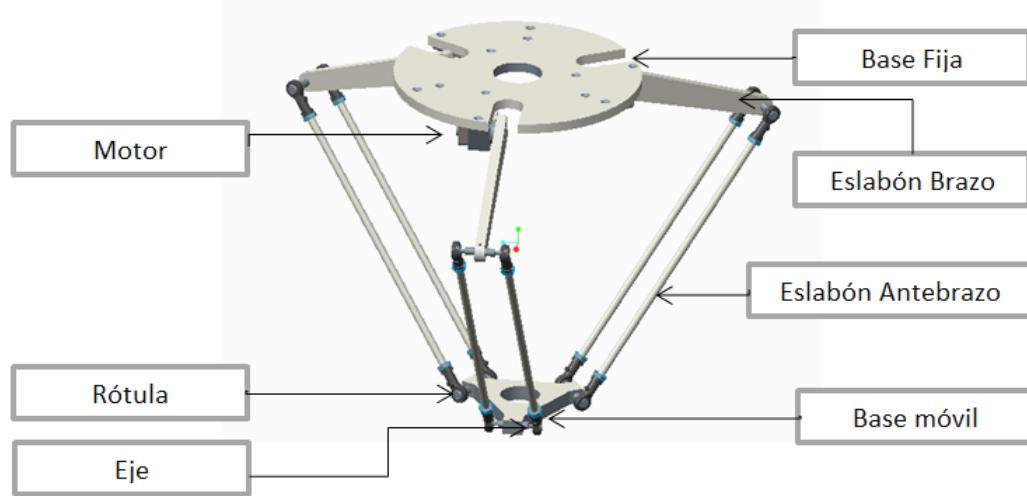
8.4. DISEÑO MECÁNICO

8.4.1. Modelo físico

El robot Delta es una configuración específica de los robots paralelos en donde un conjunto de eslabones forman cadenas cinemáticas cerradas, condición que es innata de los dichos robots.

Un robot Delta en su manifestación más común presenta la configuración que se muestra en la Figura 11 , en donde se observa el diseño y las piezas que lo conforman habitualmente.

Figura 11. Estructura Básica



Fuente: Los autores

8.4.1.1. Base fija

La base fija del robot Delta es la conexión a tierra de la máquina, en la Figura 11 no se hace referencia a la estructura que soporta esta pieza dado que esto ya no entra dentro de la configuración del Delta, el diseño es algo subjetivo que se basa en criterios mecánicos que permitirán determinar la configuración estructural de las vigas que soporten la base fija y a las solicitudes mecánicas que ella soporta de las demás piezas, como el peso, la variación de las cargas, la dinámica y fatiga que se pueda presentar, esta pieza tiene la función de soportar todo el peso de los componentes que se desprenden de la configuración, los servomotores son el punto de fijación que mediante algún suplemento o soporte a la base fija permiten la unión entre el eslabón brazo y tierra.

El diseño de la base fija debe tener en cuenta como prioridad algunos parámetros que se definen como fundamentales en la determinación de la geometría y el material de la cual estará hecha, los cuales se detallarán en el proceso de diseño posterior a esta explicación.

8.4.1.2. Eslabón Brazo

El eslabón brazo es un elemento que como se aprecia en la Figura 1 es la conexión entre el motor y la segunda conexión mecánica en una de las tres cadenas cinemáticas que conforman el robot paralelo Delta, la importancia que debe tener dentro de sus

características a la hora de realizar el diseño, son la rigidez, la baja inercia, esto para que los motores no pierdan energía solo en el proceso de vencer la inercia inicial de la pieza o puedan controlar la cantidad de impulso o energía para cuando los movimientos sean de alta precisión.

Esto se detallará en el proceso de diseño posterior a esta explicación.

8.4.1.3. Eslabón Antebrazo

El eslabón antebrazo es una pieza que va dispuesta en parejas, como se puede apreciar en la Figura 12 son tres las parejas que conforman la configuración mecánica del robot paralelo Delta.

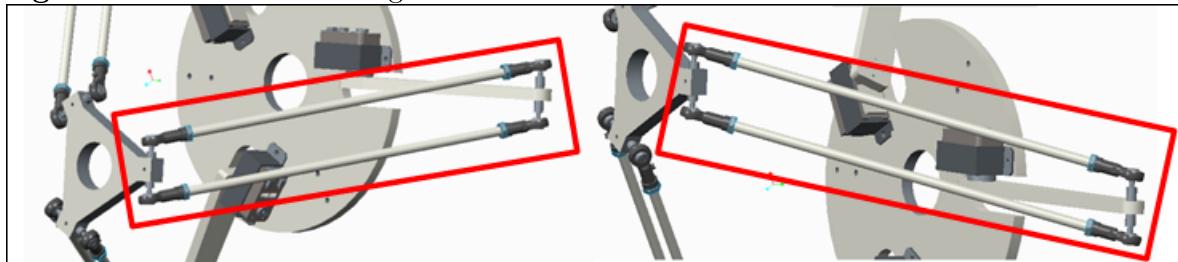
Cada pareja forma parte de la clave del movimiento del robot, porque a pesar de tener actuadores rotacionales la combinación de los tres servomotores brinda un movimiento cartesiano (x, y, z) de la base móvil, la cual estará siempre dispuesta de forma paralela a la base fija.

Este es uno de los detalles mas importantes y vistosos que hacen que el robot Delta sea un llamativo proyecto para implementar.

La pareja de eslabones antebrazo por cada eslabón brazo del robot está unida por un eje en común y la unión de cada antebrazo en su extremo está dada por una juntura universal (rótula).

Es aquí donde se puede detallar el secreto de la configuración los antebrazos siempre van a estar formando un paralelogramo, no importa la posición de la base móvil.

Figura 12. Detalle Paralelogramo



Fuente: Los autores

En la Figura 12 se puede apreciar la configuración geométrica que la pareja de antebrazos toma, al variar la posición de la plataforma móvil, la disposición de la pareja de

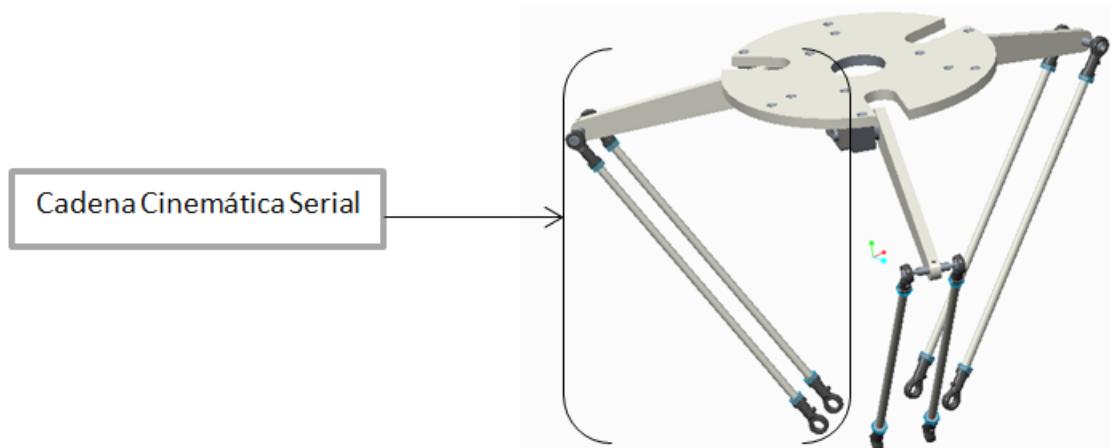
antebrazos siempre va a estar determinada por un paralelogramo que cambia su grado de inclinación pero permite mantener el paralelismo entre la base fija y la base móvil.

Para diseñar el eslabón antebrazo es necesario tener aspectos en su geometría y mecánicamente se necesita que sean bastante ligeros, pero que esa liviandad no afecte la rigidez y pueda soportar los cambios de movimiento sin que la flexión genere una deformación considerable.

8.4.1.4. Base Móvil

La base móvil es el elemento que permite cerrar las tres cadenas cinemáticas seriales que conforman el robot para darle la característica de robot paralelo (cadenas cinemáticas cerradas).

Figura 13. Cadena Cinemática



Fuente: Los autores

En la Figura 13 se muestra lo que es en principio una de las tres cadenas cinemáticas seriales que conforma la configuración del robot Delta.

Se aprecia que no existe una relación entre el punto final e inicial de la combinación de los eslabones y los actuadores, al colocar la plataforma móvil uniendo las tres cadenas cinemáticas seriales se forma el robot paralelo Delta.

La base móvil queda de forma paralela a la base fija siempre y cuando haya simetría en las tres cadenas cinemáticas seriales, en este punto es posible dejar de forma abierta la posibilidad de implementar el robot en una aplicación particular donde se necesite precisión y altas aceleraciones.

Solo se necesita adaptar el actuador necesario en la base móvil, el cual puede ser un extrusor si se pensara en la aplicación de la impresión 3D, una ventosa para las aplicaciones de pick and place, un objeto para dibujar, entre otras y gran cantidad de aplicaciones que se pueden implementar.

Para el diseño de la pieza como tal, es necesario tener aspectos de geometría al igual que la base fija, el eslabón brazo, el eslabón antebrazo, específicamente ligado al volumen de trabajo del robot, que es el espacio que puede el robot Delta puede cubrir sin que hayan singularidades mecánicas, geométricas, que son prácticamente lugares a los que el robot teóricamente puede llegar, pero mecánicamente no, por la restricción de su geometría y articulaciones, hay que tener en cuenta de igual forma la importancia en el material de la pieza, ya que se necesita que sea de gran liviandad, para evitar necesitar un alto torque en los servomotores o que se produzcan grandes cantidades de impulso, traducidas a energía perdida si se habla de precisión y velocidad simultánea y de paso hace el control del robot Delta mas estricto.

8.4.1.5. Otros aspectos a tener en cuenta

Las piezas que se han detallado hasta el momento, (Base fija, Eslabón brazo, Eslabón Antebrazo, Base móvil), tienen un factor de diseño en común y crítico para el enfoque a la impresión 3D, que va mas allá de las características y solicitudes mecánicas que el robot debe soportar y es el volumen de trabajo, definido con anterioridad en las especificaciones técnicas que debe cumplir el robot enfocado a la impresión 3D, la configuración de la geometría crítica de estos elementos en detalle se relaciona a continuación.

Base Fija: Distancia del eje del motor al centro de la pieza.

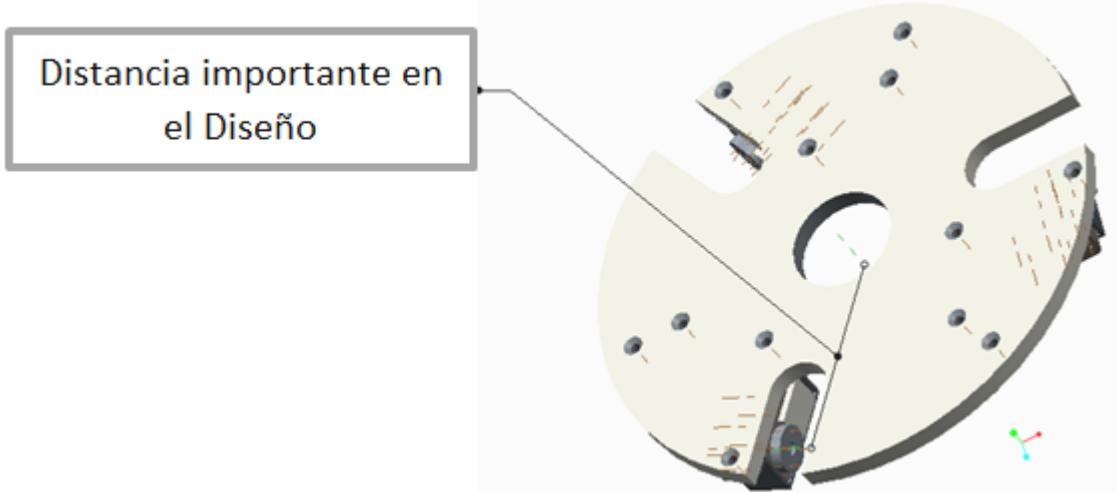
Brazo: Distancia del eje del motor al eje de la rótula.

Antebrazo: Distancia entre rótulas

Base Móvil: Distancia del eje de la rótula al centro de la pieza.

Rótulas: Las rótulas, son las juntas universales que permiten en el robot el movimiento en los tres ejes (x, y, z), con cierto grado de libertad que de alguna forma influye en el volumen de trabajo del robot Delta, es importante para su diseño tener en cuenta el material, la vida útil, el tamaño, que son factores que pueden afectar el comportamiento del robot Delta.

Figura 14. Radio mayor



Fuente: Los autores

Figura 15. Brazo



Fuente: Los autores

Ejes: Los ejes son los elementos que permiten la conexión de los eslabones del robot con las junturas universales, deben soportar el peso de los eslabones sumado al peso de la base móvil y el actuador que para este caso es el extrusor, es importante que su diseño este en función de la resistencia y rigidez del eje ya sí seleccionar el diámetro mínimo que permitirá un excelente desempeño.

8.4.2. Cálculo y definición de las dimensiones críticas del Robot Delta

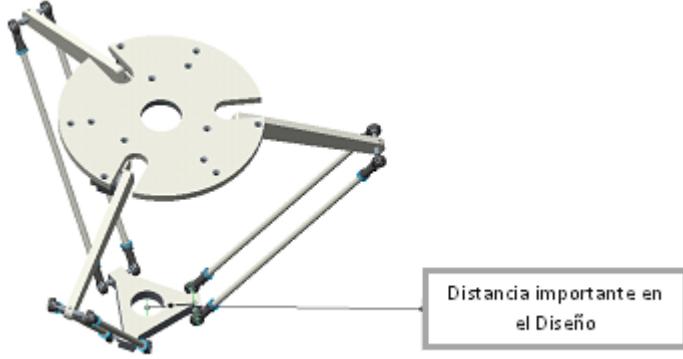
Según las especificaciones de diseño definidas para el robot Delta enfocado a la impresión 3D el espacio de trabajo debe ser de mínimo $15cm^3$, con el fin de encontrar las medidas adecuadas que permitan lograr una cobertura espacial óptima para una aplicación como la impresión 3D, se recurre a las herramientas informáticas que permiten un procesamiento matemático de alto nivel, para este caso se usa MatLab 2014, la idea

Figura 16. Antebrazo



Fuente: Los autores

Figura 17. Base Móvil



Fuente: Los autores

consiste en usar el algoritmo matemático del modelo cinemático del robot y el modelo para las restricciones geométricas.

Para iniciar se sabe que a partir de los modelos matemáticos mencionados anteriormente, se puede saber si un punto en el espacio es alcanzado por el robot Delta, si las restricciones se encuentran dentro de los parámetros y la cinemática da una valor real el punto de coordenadas (x,y,z) es accesible para el robot Delta. De igual forma se sabe que la cinemática tiene como entrada las medidas características del robot Delta (radio de la base fija, radio de la base móvil, la distancia entre ejes del brazo y la distancia entre ejes del antebrazo), por lo cual si se hace una modificación en alguna de las medidas, el volumen se verá afectado.

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a hallar el volumen de trabajo que define el robot Delta, y las medidas características del robot Delta se justificarán en el proceso,

lo que se propone es algo llamado la discretización del espacio, el espacio si se habla en términos de volumen es infinito, el espacio entre dos puntos en términos numéricos tiene infinidad de valores, pero ¿Qué pasa si dentro de esa cantidad infinita de valores se definen puntos y una distancia finita constante entre ellos?, en efecto ese espacio ahora sería finito, (cuantificable), siendo así se podrá analizar el comportamiento del robot Delta en ese volumen a partir del análisis punto a punto del modelo cinemático y las restricciones geométricas.

El software MatLab 2014, es una herramienta matemática que permite el procesamiento de información a gran escala, para encontrar el volumen de trabajo del robot Delta, se realiza un programa que genere un paralelepípedo rectangular y dentro de él una cantidad finita de puntos a partir de parámetros de entrada como son los límites en las coordenadas (-x,x ; -y,y; -z,z) y la distancia entre ellos, lo que sería la resolución:

%Definir las dimensiones del paralelepípedo a analizar

xmin=-150;

xmax=150;

ymin=-150;

ymax=150;

zmin=0;

zmax=300;

p=1; *% Aumento en cada una de las coordenadas*

Se sabe que el robot físicamente no puede alcanzar valores negativos en z, por lo cual el zmin, que el límite inferior de la medida en el eje z, empieza en cero, de esta forma se generará una figura en el espacio, conformada por x cantidad de puntos separados a p=1, los cuales serán analizados uno a uno en los modelos matemáticos, de esta forma trabajando en milímetros, se tendrá puntos separados a 1 milímetro y los límites de la figura estarán en milímetros de igual forma.

A partir del programa se observa la capacidad del robot para alcanzar el volumen propuesto según los límites y la resolución entre puntos:

Para las siguientes medidas del robot Delta, y la configuración del espacio a analizar se obtiene:

%Definir parámetros de construcción del robot

R=93.5; % Radio de la plataforma base, medido desde el eje del motor al centroide de la figura

r=58.5; % Radio de la plataforma móvil, medido desde el eje del motor al centroide de la figura

L1=176; % Longitud de los brazos del robot Delta

L2=360; % Longitud de los antebrazos del robot Delta.

%Definir las dimensiones del paralelepípedo a analizar

xmin=-150;

xmax=150;

ymin=-150;

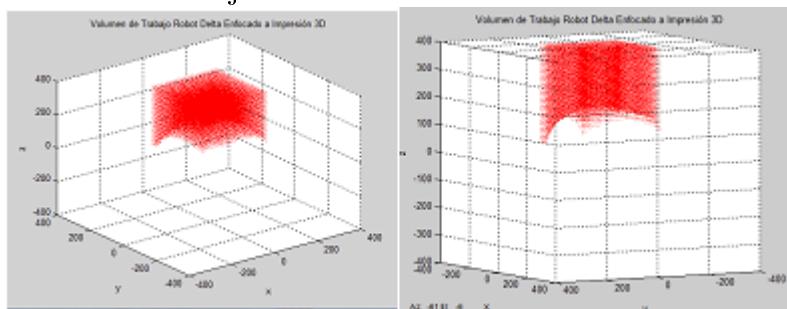
ymax=150;

zmin=0;

zmax=300;

p=10; % Aumento en cada una de las coordenadas

Figura 18. Volumen de Trabajo



Fuente: Los autores

Como se puede observar en la Figura 18, el espacio de trabajo que puede cubrir el robot paralelo Delta con las dimensiones establecidas es bastante amplio y de acuerdo con nuestras necesidades en lo que se estableció inicialmente, además se ve deformado en su parte inferior, pero en la parte superior, la cual sería el suelo del robot, la geometría se mantiene, pudiéndose generar dibujos en el espacio establecido.

La relación de las medidas establecidas, las cuales se formularon a partir de una relación que es característica de los robots paralelos Delta las cuales consisten en que el largo del

brazo es igual la mitad aproximadamente de la longitud del antebrazo y el radio de la base fija es igual al radio de la base móvil por un factor de 1.5, al cambiar esas medidas surgen situaciones y características para el robot, que se ven afectadas en cadena, es decir si la se ve aumentada la precisión del robot Delta que se puede lograr a partir de la variación de la longitud del brazo, se pierde volumen del espacio de trabajo, lo cual se puede observar a continuación:

Se van definir las mismas medidas del espacio de trabajo a evaluar, y para las medidas del robot Delta se va a modificar a la mitad la medida relacionada a la longitud del brazo.

```
%Definir parámetros de construcción del robot
```

```
R=93.5; % Radio de la plataforma base, medido desde el eje del motor al centroide de la figura
```

```
r=58.5; % Radio de la plataforma móvil, medido desde el eje del motor al centroide de la figura
```

```
L1=88; % Longitud de los brazos del robot Delta ,medida modificada a la mitad, más precisión menos volumen de trabajo
```

```
L2=360; % Longitud de los antebrazos del robot Delta.
```

```
%Definir las dimensiones del paralelepípedo a analizar
```

```
xmin=-150;
```

```
xmax=150;
```

```
ymin=-150;
```

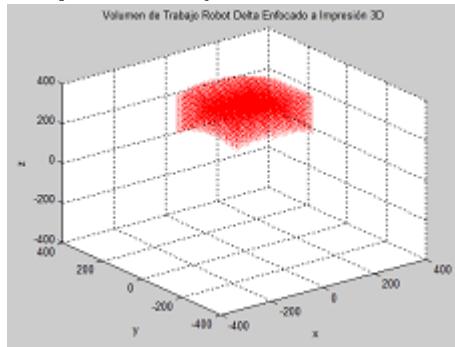
```
ymax=150;
```

```
zmin=0;
```

```
zmax=300;
```

```
p=10; % Aumento en cada una de las coordenadas
```

Figura 19. Volumen de trabajo disminuyendo L1



Fuente: Los autores

Evidentemente en la Figura 19, se puede observar la variación en el espacio de trabajo del robot paralelo Delta, se vio fuertemente reducido al variar la longitud del brazo, la explicación concerniente al aumento de la precisión de da de acuerdo con la fórmula de longitud de arco:

$$s = \vartheta * R$$

Donde s es la longitud de arco descrita para un ángulo cualquiera, R es el radio, que en este caso es la longitud del brazo y ϑ es el ángulo que el servomotor le imprime al brazo, por lo cual si se toma como constante el ángulo ϑ y se varía el radio R, en este caso la longitud del brazo, la longitud del arco se verá afectada de forma proporcional, siendo así mayor la precisión cuando el radio es menor.

Para establecer el todos los puntos alcanzados por la geometría del robot propuesta, se ajusta el valor de la longitud del brazo, y la figura de puntos que se va a evaluar se modifica ampliando los límites de trabajo.

%Definir parámetros de construcción del robot

R=93.5 % Radio de la plataforma base, medido desde el eje del motor al centroide de la figura

r=58.5; % Radio de la plataforma móvil, medido desde el eje del motor al centroide de la figura

L1=176; % Longitud del los brazos del robot Delta

L2=360; % Longitud de los ante-brazos del robot Delta.

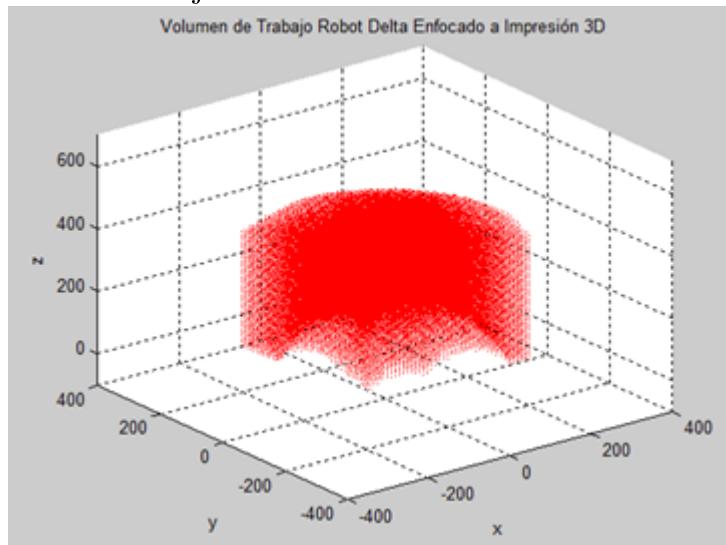
%Definir las dimensiones del paralelepípedo a analizar

```

xmin=-200;
xmax=200;
ymin=-200;
ymax=200;
zmin=50;
zmax=700;
p=10; % Aumento en cada una de las coordenadas

```

Figura 20. Volumen de trabajo final



Fuente: Los autores

En la Figura 20 se observa que el volumen es bastante amplio, tomando la mayor cantidad puntos, definiendo límites del área, por tal motivo las medidas establecidas se ajustan a las necesidades planteadas en un principio.

8.4.3. Diseño de los elementos del Robot

Partiendo de las dimensiones halladas, que son:

- Base Fija: Distancia del eje del motor al centro de la pieza = 93.5mm
- Brazo: Distancia del eje del motor al eje de la rótula = 176mm
- Ante Brazo: Distancia entre rótulas = 360mm

- Base Móvil: Distancia del eje de la rótula al centro de la pieza = 58.5mm .

Parámetros para el diseño mecánico de las piezas en general:

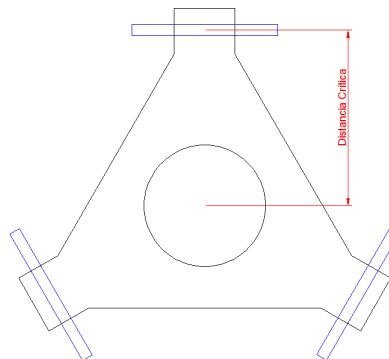
- Análisis de las solicitudes mecánicas de la pieza.
- Determinar la geometría.
- Escoger el material.
- Justificación de la pieza.

8.4.3.1. Diseño de la Base Móvil

La base móvil como se ha mencionado anteriormente es una pieza que se necesita que sea ligera y rígida, en el sentido en que solo servirá de apoyo para el efecto final de la aplicación para la que se está diseñando el robot Delta, que es la impresión 3D, la geometría de la base móvil en primera instancia deberá estar sujeta a la condición de la medida crítica, donde la distancia del eje de la rótula al centro de la pieza debe ser igual a 58.5mm, el peso del efecto final, que para este caso sería un extrusor, puede variar entre 300 gramos – 500 gramos, dependiendo de la configuración de este.

La geometría que se plantea para la base móvil se puede apreciar en la Figura 21, en donde con el fin de evitar el mayor peso, se propone una geometría irregular para un menor volumen, el agujero central de la pieza se propone con el fin de alivianar la pieza, además de dejar el espacio para la fácil instalación de un extrusor, las tres salientes que la pieza tiene se deben colocar debido a que se necesitan ensamblar en cada una un eje, (rectángulos en azul), que llevan en sus extremos las rótulas, entonces para facilidad de mecanizado se propone que sea una superficie plana.

Figura 21. Diseño Base Móvil



Fuente: Los autores

El material indicado para la base móvil debe ser uno que permita que la pieza sea liviana, que el mecanizado sea sencillo y rápido, que sea de fácil adquisición y bajo coste, en principio se propone aluminio o acrílico como las opciones potenciales que por experticia se podrían usar.

Aunque son dos materiales totalmente diferentes en su composición ya que uno es metal y el otro es una variante de los plásticos, la condición semejante que para el caso de la pieza en cuestión es el peso específico, el fácil mecanizado y el costo.

El peso específico del aluminio es igual $2700 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 = 26487 \text{ N/m}^3$

El peso específico del acrílico es igual $1190 \text{ kg/m}^3 * 9.81 \text{ m/s}^2 = 11673.9 \text{ N/m}^3$

La relación de peso es de más del doble, en donde el acrílico es más liviano que el aluminio, de tal forma que por peso el acrílico es la mejor opción, en términos de mecanizado, el aluminio es un material blando, de fácil torneado, pero este caso hacer la figura implica un proceso manual bastante demorado y si se hiciera en una máquina automática sería costoso; por otro lado el acrílico es un material de igual forma blando, que en términos de mecanizado tiene la ventaja de que permite que se puedan hacer figuras de una lámina de acrílico de x espesor mediante corte con láser y el proceso es económico, por lo cual y para el caso del robot Delta el material con condiciones de mecanizado más favorables, según el costo y la facilidad es el acrílico.

Usando el software Creo Parametric Student Version se crea la pieza y se le da las propiedades del material, se realiza en acrílico de 15 milímetros de espesor, esta medida es subjetiva y puede estar sujeta a cambios, debido a que depende el diámetro de los ejes a los que van unidas las rótulas, pero se deduce que el diámetro por lógica no puede tener mas de 15 milímetros, en la Figura 22 se detalla la geometría de la pieza donde se realizan los huecos donde irían los ejes, dentro de la misma hay un recuadro, que es lugar donde se le asigna la propiedad de densidad del material.

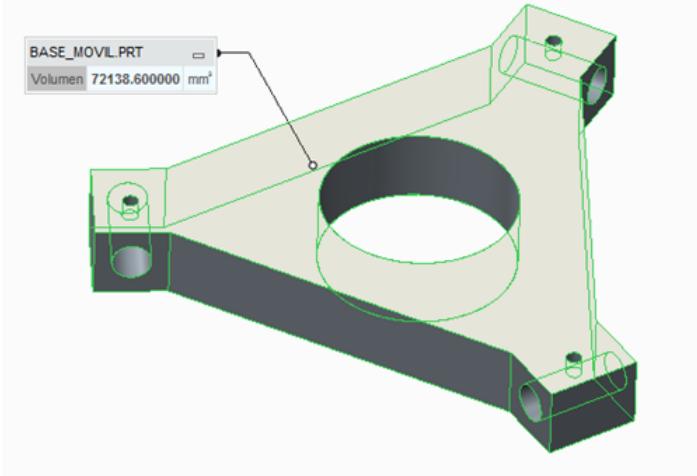
Figura 22. Base Móvil Sólida



Fuente: Los autores

Mediante la herramienta de medida del software Creo Parametric, se halla el volumen de la pieza, esto con el fin de hallar el peso, en la Figura 23 se evidencia el volumen en mm^3

Figura 23. Volumen Base Móvil



Fuente: Los autores

Se halla el peso, con el dato del volumen y el peso específico

$$72138.6 \text{ } mm^3 \rightarrow 0.0000721386 \text{ } m^3$$

$$\text{Peso de la base Móvil} = 0.0000721386 \text{ } m^3 * 11673.9 \text{ N/m}^3$$

$$\text{Peso de la base Móvil} = 0.0000721386 \text{ } m^3 * 11673.9 \text{ N/m}^3$$

$$\text{Peso de la base Móvil} = 0.84 \text{ Newtons}$$

$$\text{Masa de la base Movil} = 0.84 \text{ Newtons} / 9.81 \text{ m/s}^2 = 0.085 \text{ Kg}$$

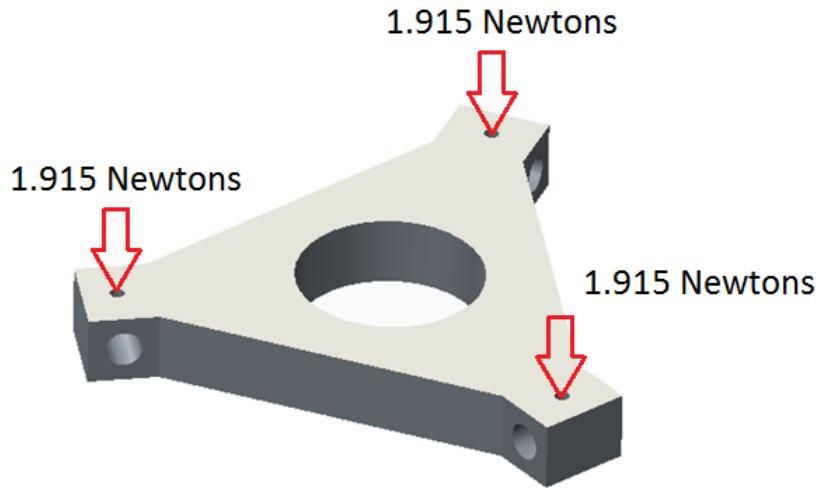
$$\text{Peso de la base Móvil} + \text{Peso del extrusor} = 0.84 \text{ Newtons} + (0.5 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$\text{Peso de la base Móvil} + \text{Peso del extrusor} = 5.745 \text{ Newtons}$$

La carga del peso total la soportan los ejes, la pieza es una figura simétrica, por lo cual la fuerza debido al peso total estará dividida en los tres ejes, donde:

La carga puntual que absorbe cada eje es de $(5.745 \text{ Newtons} / 3) = 1.915 \text{ Newtons}$ (Figura 24).

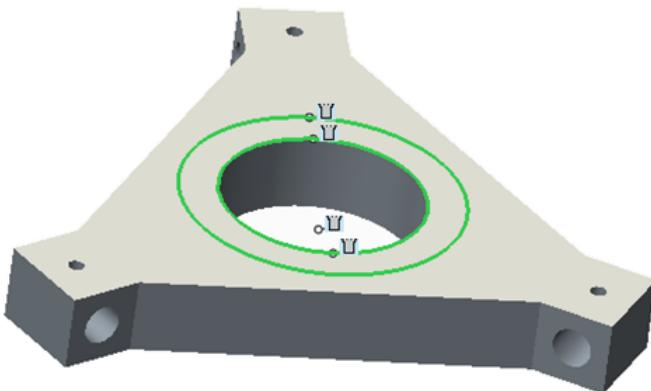
Figura 24. Cargas Base Móvil



Fuente: Los autores

Con la ayuda de Creo Parametric Student Version se realiza la simulación del desplazamiento que genera la carga a partir de la fuerza aplicada sobre determinada área, para ello se genera el área sobre la cual va a estar sentada la carga. (Figura 25).

Figura 25. Fuerza de la carga



Fuente: Los autores

La región de la Figura 25 delimitada por las dos circunferencias verdes es el área donde la pieza va a soportar el peso del extrusor, para hallar la relación de fuerza sobre área que se ejerce en ese tramo se realiza el siguiente procedimiento:

D₁= 0.04m;

D₂=0.055m

$$\text{Área de la región} = \pi/4 * D_2^2 - \pi/4 * D_1^2$$

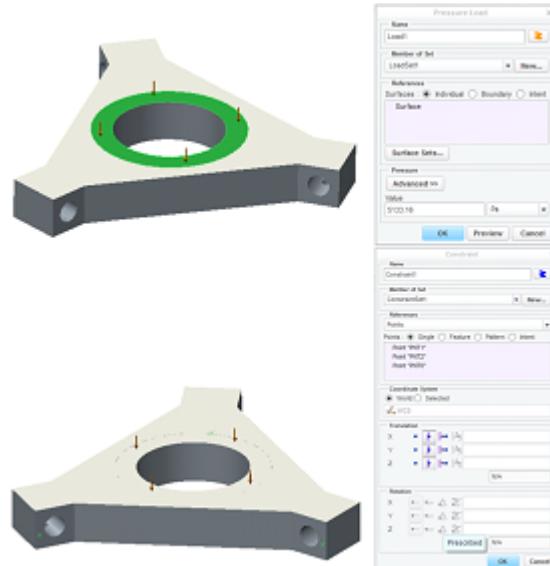
$$\text{Área de la región} = 0.001119 \text{ m}^2.$$

$$\text{Fuerza en el área} = (5.745 \text{ Newtons})/0.001119 \text{ m}^2.$$

Fuerza en el área= 5133.165 Pascales

En la Figura 26 se observa como se coloca la fuerza sobre el área que se halló, además de las restricciones a las que está sometida la pieza.

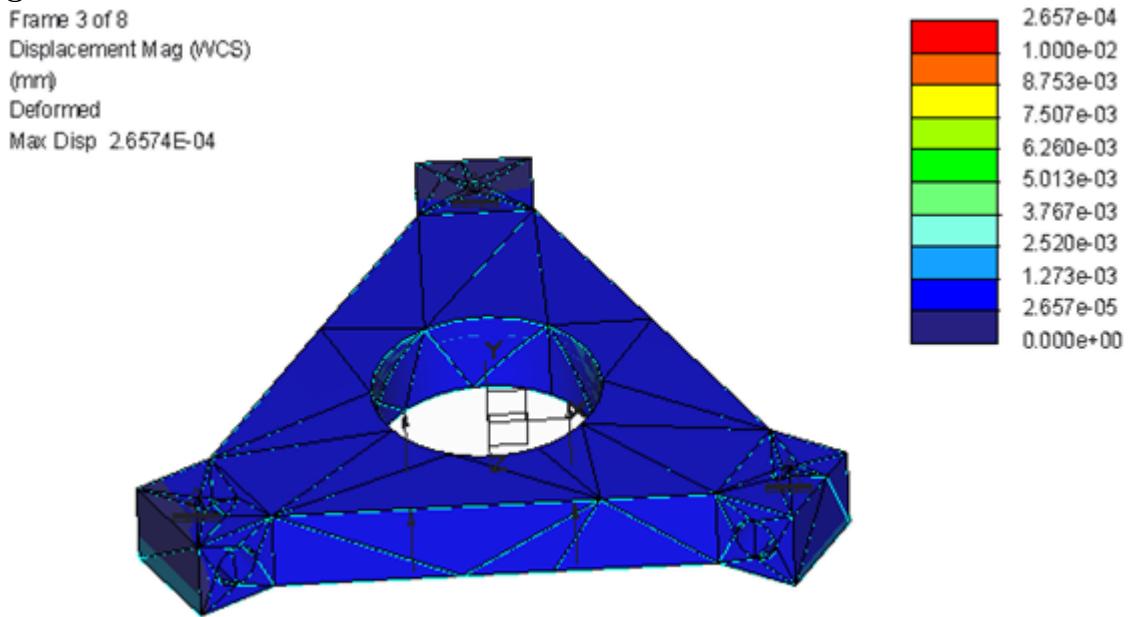
Figura 26. Fuerzas y restricciones



Fuente: Los autores

A partir de las condiciones establecidas se realiza un análisis de resistencia de materiales, con el fin de averiguar la deformación que tiene la pieza, en la Figura 27 se observa el resultado de la simulación, las medidas se encuentran en mm.

Figura 27. Resistencia Base Móvil



Fuente: Los autores

En la Figura 28, se detallan resultados como el desplazamiento en mm en los tres ejes principales (x, y, z), (recuadros rojos) en donde el valor es significativamente bajo por lo cual es seguro que no habrá problema alguno, el esfuerzo (stress), está dado en Pascales (N/m^2), de igual forma que la medida anterior es muy bajo comparado con el módulo de flexión del acrílico.

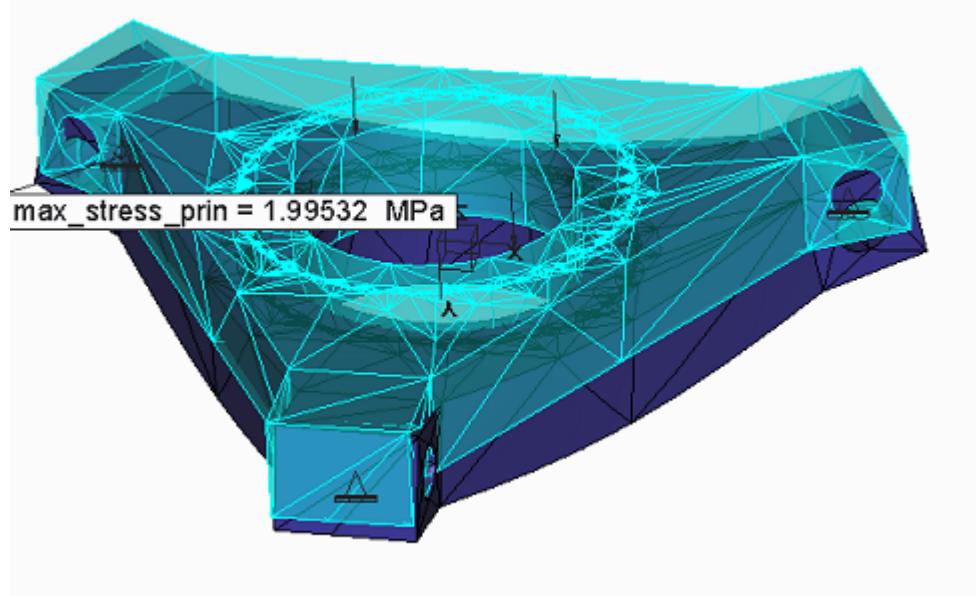
Figura 28. Resultados Base Móvil

Measure Name	Value	Measure Name	Value
max_disp_mag	0.000265736	max_rot_x	0
max_disp_x	3.61515e-05	max_rot_y	0
max_disp_y	0.000283008	max_rot_z	0
max_disp_z	6.91135e-05	max_stress_prin	1.99532
max_pres_mag	-12.342	max_stress_vmax	10.9447
max_rot_mag	0	max_stress_xx	-4.94258
max_rot_x	0	max_stress_xy	2.07249
max_rot_y	0	max_stress_xz	-2.18187
max_rot_z	0	max_stress_yy	-12.1356
max_stress_prin	1.99532	max_stress_yz	3.03013
max_stress_vmax	10.9447	max_stress_zz	-3.61108
max_stress_xx	-4.94258	min_stress_prin	-12.342

Fuente: Los autores

En flexión el acrílico tiene la capacidad de soportar un esfuerzo máximo de 11Mpa, a partir del dato de 1,9 Mpa como esfuerzo máximo, tomado de la simulación del comportamiento del objeto, se procede a hallar el factor de seguridad simple.

Figura 29. Esfuerzo MÁximo base móvil



Fuente: Los autores

En flexión el acrílico tiene la capacidad de soportar un esfuerzo máximo de 11Mpa, a partir del dato de 1,9 Mpa como esfuerzo máximo, tomado de la simulación del comportamiento del objeto, se procede a hallar el factor de seguridad simple.

$$N = 11 \text{ Mpa} / 1,9 \text{ Mpa}$$

$$N = 5,7 \text{ Mpa}$$

8.4.3.2. Diseño eje antebrazo

El diseño del eje que va en cada par de antebrazos, se establece que es una pieza que soporta el peso del extrusor y el peso de la base móvil, dentro de su funcionamiento no hay rotación, lo que implica que se puede diseñar simplemente como una viga de sección redonda sometida a flexión pura, a continuación se presenta el cálculo del diámetro que debería tener el eje para soportar la carga.

Para iniciar el cálculo se necesita definir el material, para el caso del eje se proponen dos opciones por temas de facilidad del mecanizado y facilidad de adquisición del material, el primero es acero 12L14 que es un material blando comparado con los demás aceros, esta condición lo hace mas liviano lo que es una condición importante para el diseño de

estos ejes, se necesita que sean capaz de soportar la carga y que sean livianos, con el fin de evitar pesos innecesarios, que en adelante se verían traducidos en un mayor torque; la segunda opción es el aluminio, que es un material muy liviano, que permite que su mecanizado sea sencillo, anticorrosivo, ideal para pieza que quedan a la vista, de bajo costo y fácil adquisición, en este punto se compara la densidad de los dos materiales con el fin de saber la relación de peso:

$$\text{Acero 12L14} = 7.87 \text{ g/cm}^3$$

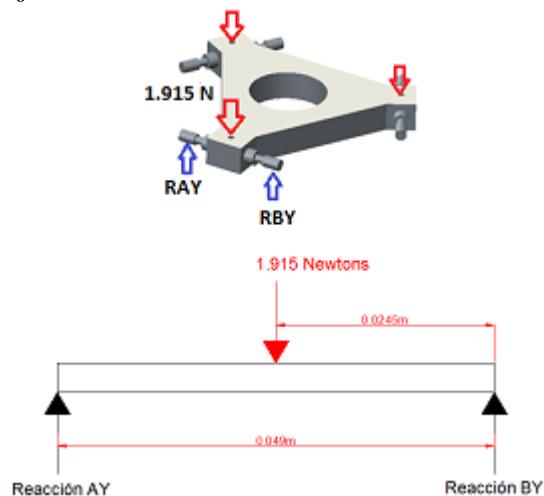
$$\text{Aluminio} = 2.70 \text{ g/cm}^3$$

Evidentemente el peso se vería reducido en una factor de 2.9 si se usará el aluminio, por lo cual es una ventaja provechosa, además del factor anticorrosivo y costo, tomando como referencia estos sencillos parámetros, el material que se toma para el diseño del eje es aluminio.

Para realizar el cálculo del eje, se recurre a la resistencia de materiales y como en todo elemento se procede a realizar el diagrama de esfuerzo y el diagrama de momento, para analizar las condiciones de máxima carga que deberá soportar el eje.

El eje deberá soportar la carga puntual encontrada en el procedimiento anterior, además debe contar con dos apoyos que son las rótulas, en la Figura 30 se evidencia el planteamiento que se hace para un eje, aclarando que los tres se encuentran en igualdad de condiciones.

Figura 30. Cargas en Ejes



Fuente: Los autores

Reacciones:

$\sum f_y = 0$; Sumatoria de fuerzas en y, se toma hacia arriba positivo.

$$\sum f_y = R_{ay} + R_{by} - 1.915 \text{ Newton} = 0$$

$$R_{ay} = -R_{by} + 1.915 \text{ Newton}$$

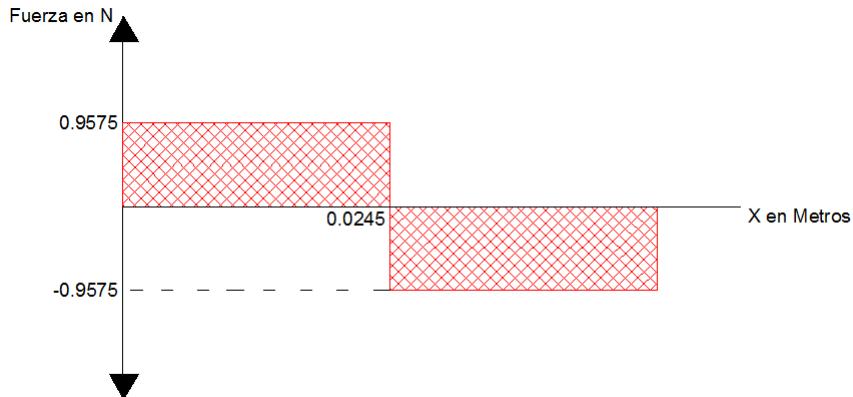
$\sum M_A = 0$; Sumatoria de momentos en A, se toma anti-horario positivo.

$$\sum M_A = -1.915 \text{ N} * 0.0245 \text{ m} + R_{by} * 0.049 \text{ m} = 0$$

$$R_{by} = +0.9575 \text{ Ray} = -0.9575 + 1.915 \text{ Newton}$$

$$Ray = +0.9575 \text{ Newton}$$

Figura 31. Diagrama de esfuerzo



Fuente: Los autores

Para $0 \leq x \leq 0.0245$

$$\text{Memento}(x) = Ray * x$$

$$\text{Memento}(0.0245) = 0.9575 \text{ N} * 0.0245 \text{ m}$$

$$\text{Memento}(0.0245) = 0.02345 \text{ Nm}$$

Para $0.0245 \leq x \leq 0.049$

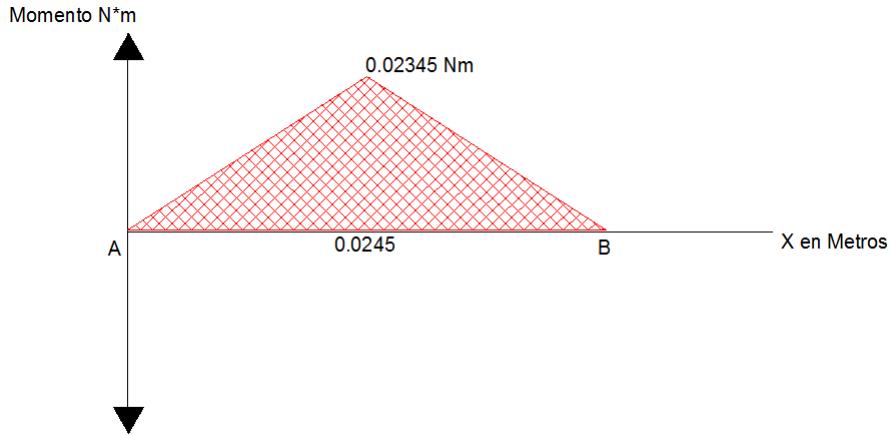
$$\text{Memento}(x) = Ray * x - 1.915 * (x - 0.0245)$$

$$\text{Memento}(0.049) = Ray * 0.049 - 1.915 * (0.049 - 0.0245)$$

$$\text{Memento}(0.049) = 0$$

$$\text{Memento máximo} = 0.02345 \text{ Nm}$$

Figura 32. Diagrama de momento



Fuente: Los autores

$$\sigma f_{eje} = \frac{M_{max} * C}{I}$$

Como el eje es circular,

El centroide (c) = Diámetro/2.

La inercia (I) = $(\pi/64) * Diámetro^4$

El esfuerzo admisible del aluminio es igual a 100Mpa

$\sigma f_{admissible} = 100Mpa$

Se escoge un factor de seguridad de $N = 4$

$$N = \frac{\sigma f_{admissible}}{\sigma f_{eje}}$$

$$4 = \frac{100Mpa}{\sigma f_{eje}}$$

$$\sigma f_{eje} = 25MPa$$

$$25MPa = \frac{(0,02345Nm * \phi/2)}{(\pi/64 * \phi^4)}$$

$$\phi = 0.00212 \text{metros}$$

$$\phi = 2.12 \text{mm}$$

Evidentemente el diámetro es muy pequeño para realizar la pieza bajo estas condiciones, se necesita un material en dimensiones que permitan su fácil adquisición, además el tema del mecanizado es de vital importancia y diámetros tan pequeños en proceso de

torneado son complicados de manejar, debido a que no se puede darle la medida exacta a un cilindrado, porque la fuerza que ejerce la herramienta de corte en el material hace que el proceso el eje se flexione y no se pueda trabajar; por ende se necesita un mayor diámetro, que también debe estar ligado a la condición comercial de las rótulas.

8.4.3.3. Selección de Rótulas

Para la selección de las rótulas es necesario ligar la condición comercial, debido a que son piezas no muy comunes en el mercado colombiano, por el tamaño y características, se realizaron varias cotizaciones a proveedores, donde el proveedor colombiano Comercial de Rodillos LTDA ofrece unas alternativas muy buenas en términos de costo y disponibilidad, las cuales son:

Rótulas IKO PHSA, las medidas mas pequeñas que poseen en su oferta, son las rótulas PHSA 5 y PHSA 6, el número que acompaña al identificador es el diámetro para el eje que están diseñadas, en este caso este detalle es parte del factor de selección del diámetro del eje.

Las rótulas IKO PHSA son tipo hembra lo que permite que al hacer el antebrazo solo se necesite hacer una rosca externa en las puntas de este para hacer el empalme, por lo cuál el diámetro del eslabón antebrazo debe ser del diámetro de la rosca de la rótula, si se escogiera una rótula macho IKO POS se tendría el inconveniente de que el antebrazo necesitaría una dimensión superior a la de la rosca de la rótula, esto con el fin de realizar la rosca interna, entonces la dimensión del eslabón sería el diámetro de la rosca mas una pared para la rosca y esto tendría efectos consecuentes en el torque del motor, en la Figura 33, se muestran los dos tipos.

Figura 33. Rótulas



Fuente: <http://comercialderodillos.com/rotulas.html>

La elección en primera instancia para el análisis del cumplimiento de la necesidad del robot Delta enfocado a la impresión 3D se hace por temas de facilidad de mecanizado

para el ajuste de rodamiento que se debe hacer a las puntas de los ejes con el fin de incrustar el eje en la rótula, la cabeza de rótula a analizar es la IKO PHSA 6 hembra, que tiene las siguientes características según el catálogo de IKO PILLOBALLS.

Figura 34. Catálogo Rótulas

Identification number	Mass (Ref.) g	d	Boundary dimensions mm											Static load capacity C_s N		
			Thread G	d_2	C_1	B	d_1	l_4	h_1	l_3	l_5	W	d_3	d_L		
PHSA 5	17	5	M 5×0.8	17	6	8	7.7	35.5	27	16	4	9	9	11	0.2 11.112 (1.76)	5 470
PHSA 6	25	6	M 6×1	19.5	6.75	9	9	39.7	30	16	5	11	10	13	0.2 12.700 (2.20)	6 760
PHSA 8	45	8	M 8×1.25	24	9	12	10.4	48	36	19	5	14	12.5	16	0.2 15.875 (2.60)	10 200
PHSA 10	70	10	M10×1.5	28	10.5	14	12.9	57	43	23	6.5	17	15	19	0.2 19.050 (3.00)	13 100
PHSA 12	105	12	M12×1.75	32	12	16	15.4	66	50	27	6.5	19	17.5	22	0.2 22.225 (3.40)	16 400
PHSA 14	155	14	M14×2	36	13.5	19	16.9	75	57	30	8	22	20	25	0.3 25.400 (4.00)	20 000

Fuente: Catálogo PILLOBALLS IKO Company

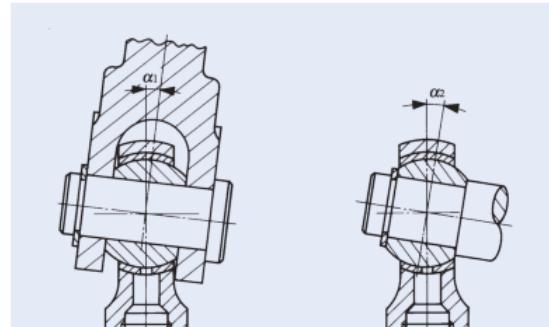
Debido a la disponibilidad inmediata de la cantidad de rótulas, el proveedor ofrece la rótula IKO PHSA 6, con la condición de que la rosca interna es M6x1.0 es Izquierda, este detalle no afecta el funcionamiento de la rótula en el robot Delta, por lo cual se acepta el término.

La capacidad estática de la rótula es de 6760N, lo que implica que en este aspecto se encuentra sobredimensionada, debido a que esta soporta la carga de la reacción calculada anteriormente Ray ó Rby que es de 0.9575 Newtons.

Otro aspecto importante a tener en cuenta, para el diseño de la pieza y el ensamblaje al conjunto total del robot Delta en Creo Parametric son los grados de libertad que tiene

la rótula, en la Figura 35 se puede detallar este factor.

Figura 35. Catálogo Rótulas 2



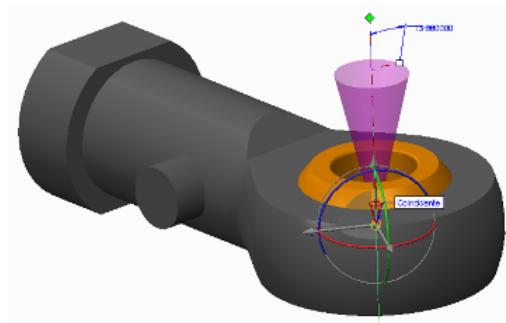
The figure shows two views of a ball joint. The left view shows a side cross-section with an angle labeled α_1 . The right view shows a top-down cross-section with an angle labeled α_2 . Below the drawings is the text "unit: degree".

d Bore diameter mm	PB ⁽¹⁾ , PHS, POS PHS...EC, POS...EC		PHSA	
	α_1	α_2	α_1	α_2
3	7	13	—	—
4	7	13	—	—
5	8	13	7	13
6	8	13	7	13
8	8	14	8	14
10	8	14	8	14
12	8	13	8	13

Fuente: Catálogo PILLOBALLs IKO Company

Son 13° grados los se permite que sean girados en dos ejes, debido a que en el tercer eje tiene la libertad de girar 360° grados, en la Figura 7.29 se observa la condición establecida en Creo Parametric, esto con el fin de realizar movimientos y simulaciones con esta restricción tan importante.

Figura 36. Ángulo Rótulas

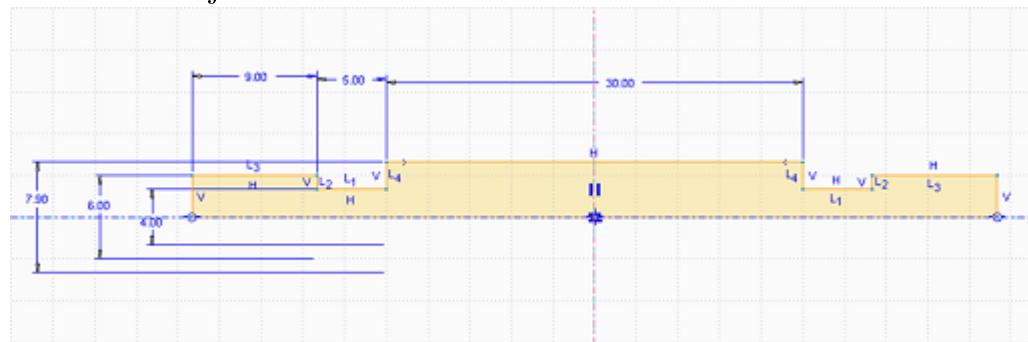


Fuente: Los autores

Para la cuestión relacionada al mecanizado del eje y la tolerancia que debe tener el cilindrado, para el ensamble correcto del cuerpo eje con la rótula, se identifica la tolerancia del hueco de la cabeza de rótula según el catálogo de PILLOBALLs la cual es de: +0.063mm, -0.012mm.

La geometría que se propone para el eje del antebrazo es, Figura 7.30, que es la sección de revolución definida para hacer la pieza en Creo Parametric.

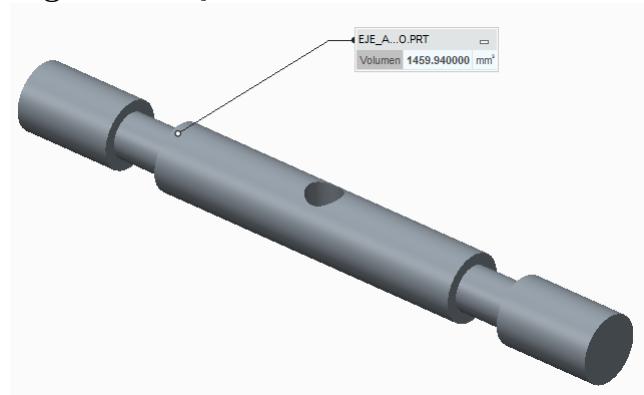
Figura 37. Plano Eje



Fuente: Los autores

Se necesita hallar el peso del eje para poder incluirlo en la sumatoria de pesos, para ello se calcula el volumen de la pieza mediante la herramienta Creo Parametric, se visualiza en la Figura 38.

Figura 38. Eje Sólido



Fuente: Los autores

Como el material se escogió para el eje fue aluminio y su densidad es de 2.70 g/cm^3 , el peso del eje es de:

Masa del eje= $2.70 \text{ g/cm}^3 * 1.4599 = 4 \text{ gramos}$

Peso del eje= $0.004 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$.

Peso del eje= 0.038 Newtons

El ensamble de las rótulas se hace a partir de la rosca externa del eje del antebrazo y la rosca interna de las rótulas, pero adicionalmente se necesita una tuerca que permita alinear y graduar la rótula con respecto a su gemela dispuesta simétricamente en el extremo opuesto del antebrazo, en la Figura 39 se puede apreciar la condición que hace necesaria una tuerca en cada extremo de cada antebrazo.

Figura 39. Orientación Rótulas

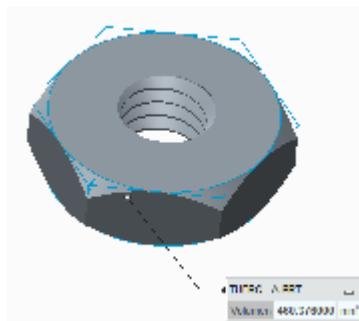


Fuente: Los autores

Para el diseño de las tuercas que son necesarias para el ajuste de la condición mencionada, se debe tener en cuenta que la medida de la rosca de la rótula que es M6x1 izquierda no se encuentra de forma comercial, por tanto es necesario fabricarlas, el material que se propone, por su liviandad, facilidad de adquisición en el comercio es el acero 12L14, hexagonal.

Para hallar el peso de la tuerca se recurre a Creo Parametric de donde se saca el volumen y con este se halla el peso, esto con el fin de tener en cuenta el peso que generan las piezas en el robot y las reacciones en cada pieza que afecten, en la Figura 40 se detalla el volumen en mm^3 .

Figura 40. Tuerca



Fuente: Los autores

La densidad del material Acero 12L14 es igual a 7.87 g/cm^3 , se procede a hallar la masa y el peso de la pieza.

Masa tuerca= $7.87 \text{ g/cm}^3 * 0.46037 \text{ cm}^3$.

Masa tuerca= 3.62 gramos.

Peso tuerca= $0.00362 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$.

Peso tuerca= 0.0355 Newtons.

Esta información es necesaria para el cálculo del antebrazo.

8.4.3.4. Diseño del Antebrazo

El antebrazo del robot Delta es un eslabón que viene dispuesto en parejas por cada cinemática serial del mismo para un total de seis piezas, el motivo de las parejas es formar el paralelogramo que se ha mostrado de forma previa, dicha figura geométrica formada por el par de antebrazos y un par de ejes, donde cada eje cierra la figura en los extremos de cada antebrazo tal forma que se pueda cumplir la condición geométrica.

Si se analiza la pieza de forma mecánica, cada eslabón soporta en uno de sus extremos una fuerza que compone la magnitud de la reacciones hallada anteriormente, el peso de la rótula y el peso de la tuerca; en su extremo opuesto soporta una fuerza que tiene como magnitud la sumatoria anterior pero un sentido opuesto.

Figura 41. Reacciones Antebrazo



Fuente: Los autores

Por estática:

$$\sum F_y = 0 \text{ Sumatoria de Fuerzas en Y} = 0$$

$$\sum F_y; \text{Tensión} + 2 \cdot \text{Peso Tuercas} + 2 \cdot \text{Peso Rótulas} + \text{Peso eje}/2 = \text{Reacción}$$

$$\text{Peso rótula} = 0.025 \text{Kg} * 9.81 \text{m/s}^2 = 0.2452 \text{ Newtons.}$$

$$\sum F_y; 0.9575 \text{N} + 2 * 0.0355 \text{N} + 2 * 0.2452 \text{ N} + (0.038/2) = \text{Reacción}$$

$$\sum F_y; 0.9575 \text{N} + 2 * 0.0355 \text{N} + 2 * 0.2452 \text{ N} + 0.019 \text{N} = \text{Reacción}$$

$$\sum F_y; 0.9575 \text{N} + 0.071 \text{N} + 0.49 \text{ N} + 0.019 \text{N} = \text{Reacción}$$

$$\sum F_y; 1.5379 \text{ Newtons} = \text{Reacción}$$

El material que se propone para la construcción del eslabón es el aluminio redondo, por las especificaciones y prestaciones mencionadas anteriormente, la pieza está sometida en primera instancia a un esfuerzo de tracción simple, se calcula el diámetro que debería tener el eslabón para un factor de seguridad de 4:

$$\sigma f_{antebrazo} = \text{Tensión/Area}$$

$$\sigma f_{antebrazo} = (1.5379 \text{N}) / (\frac{\pi}{4} * \phi^2)$$

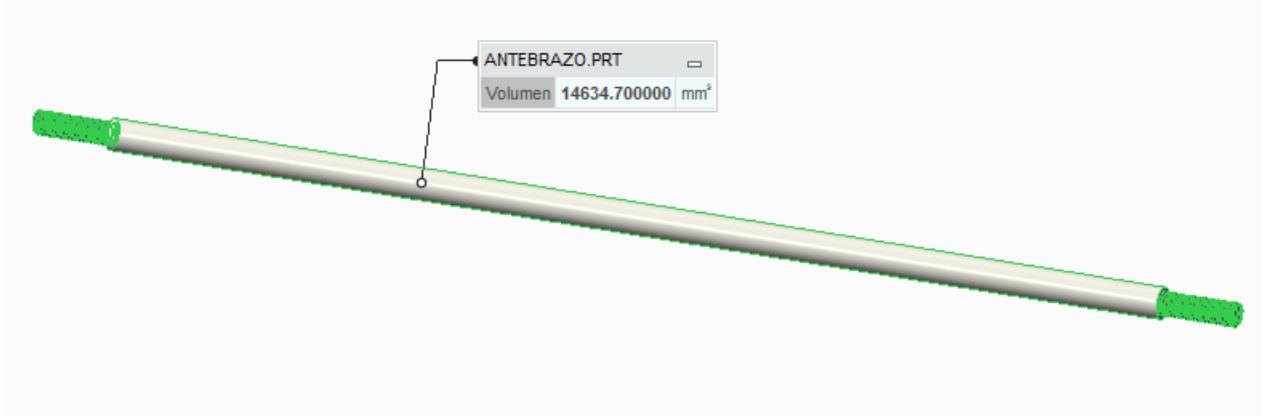
$$N = \frac{\sigma_{admissible Aluminio}}{\sigma f_{antebrazo}}$$

$$4 = \frac{100 \text{Mpa}}{(1.5379 \text{N}) / (\frac{\pi}{4} * \phi^2)} = 0.00279 \text{ m}$$

El diámetro que se escoge es de $5/16"$, es una medida comercial que se ajusta a la dimensión calculada por ser superior, además con esta medida se contempla la condición que se debe cumplir para la rosca externa que deben de llevar los antebrazos en cada punta con el fin de ensamblar la rótula, entonces se recuerda que de forma previa se definió una rótula PHSA 6, la cual tiene una rosca M6x1 izquierda, el diámetro mínimo para realizar una rosca externa para esa referencia es de 6 milímetro, condición cumplida con los 7.93 milímetros que son la equivalencia de las $5/16"$ de pulgada.

Se halla el peso del antebrazo con el fin de sumar esta componente a la tensión que el eje soporta, para ello recurre a Creo Parametric, con el fin de encontrar el volumen.

Figura 42. Volumen Antebrazo



Fuente: Los autores

Como el material se escogió para el antebrazo fue aluminio y su densidad es de 2.70 g/cm³, el peso del antebrazo es de:

$$\text{Masa del antebrazo} = 2.70 \text{ g/cm}^3 * 14.6347 \text{ cm}^3 = 40 \text{ gramos}$$

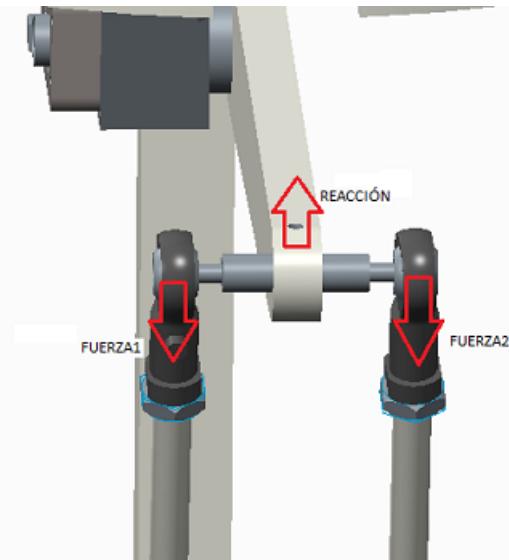
$$\text{Peso del antebrazo} = 0.04 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2.$$

$$\text{Peso del antebrazo} = 0.3876 \text{ Newtons}$$

8.4.3.5. Diseño eje brazo

Para realizar el diseño del brazo se hace un procedimiento similar al que se realizó para el eje del antebrazo, esta pieza cumple el mismo funcionamiento del eje mencionado anteriormente, pero se encuentra en condiciones diferentes en cuanto a la magnitud de la tensión que soporta, el primer paso es calcular el peso que soporta y evaluar los apoyos que tiene, en la Figura 43 se detallan las fuerzas a las que se encuentra sometida la pieza.

Figura 43. Fuerzas Antebrazo



Fuente: Los autores

Donde:

$$\text{Fuerza1} = \text{Fuerza2}$$

$$\text{Fuerza1} = \text{Tensión} + \text{Peso antebrazo}$$

$$\text{Fuerza1} = 1.5379\text{N} + 0.3876\text{N}$$

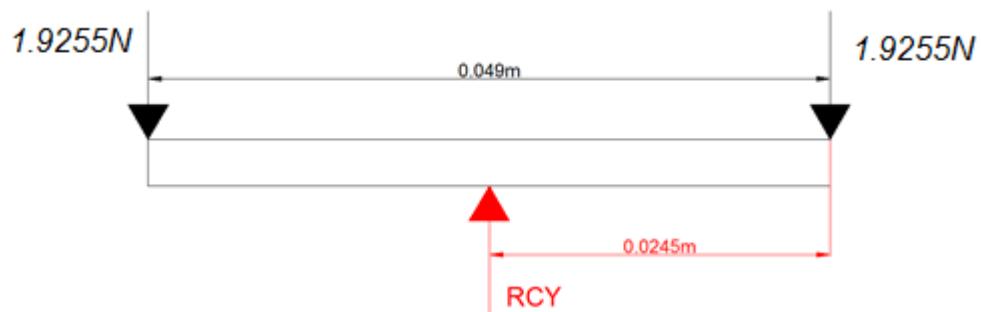
$$\text{Fuerza1} = 1.9255\text{N}$$

$$\text{Reacción} = \text{Fuerza1} + \text{Fuerza2}$$

$$\text{Reacción} = 1.9255\text{N} + 1.9255\text{N}$$

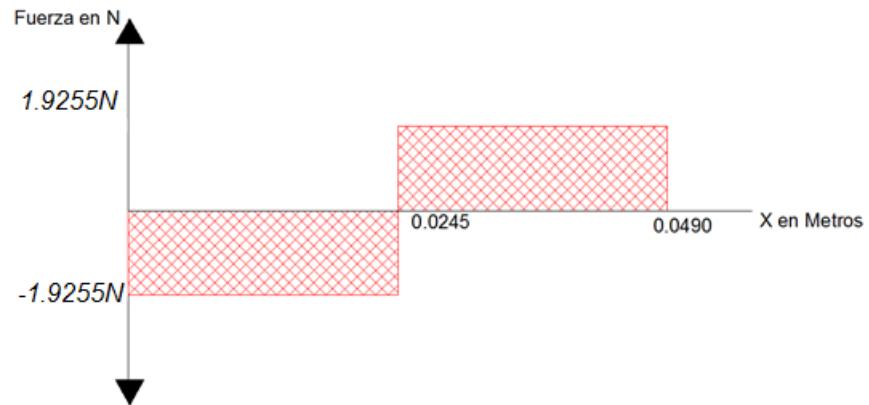
$$\text{Reacción (Rcy)} = 3.851\text{N}$$

Figura 44. Cuerpo Libre Eje Antebrazo



Fuente: Los autores

Figura 45. Esfuerzos Eje Antebrazo



Fuente: Los autores

Para $0 \leq x \leq 0.0245$

$$\text{Memento}(x) = -1.9255N \cdot x$$

$$\text{Memento}(0.0245) = -1.9255N \cdot 0.0245m$$

$$\text{Memento}(0.0245) = -0.0471Nm$$

Para $0.0245 \leq x \leq 0.049$

$$\text{Memento}(x) = -1.9255N \cdot x + R_{cy} \cdot (x - 0.0245)$$

$$\text{Memento}(0.049) = -1.9255N \cdot 0.049 + 3.851N \cdot (0.049 - 0.0245)$$

$$\text{Memento}(0.049) = 0$$

$$\text{Memento m\'aximo} = -0.0471Nm$$

Figura 46. Momentos Eje Antebrazo



Fuente: Los autores

El material que se escoge es aluminio, de acuerdo con la justificación para el del antebrazo.

$$\sigma f_{eje} = (M_{max} * C) / I$$

Como el eje es circular,

El centroide (c)= Diámetro/2,

$$La inercia (I)= (\pi/64) * Diámetro^4$$

El esfuerzo admisible del aluminio es igual a 100Mpa

$$\sigma f_{admissible} = 100 \text{ Mpa}$$

Se escoge un factor de seguridad de $N= 4$

$$N = \frac{\sigma f_{admissible}}{\sigma_{eje}}$$

$$4 = \frac{100 \text{ Mpa}}{\sigma_{eje}}$$

$$\sigma_{eje} = 25 \text{ MPa}$$

$$25 \text{ MPa} = (0.0471 \text{ Nm} * \phi^2) / (\pi / 64 * \phi^4)$$

$$\phi = 0.00278 \text{ m}$$

$$\phi = 2.78 \text{ mm}$$

De acuerdo con las condiciones establecidas para la selección del diámetro del eje del antebrazo, se establece la misma relación, primordialmente la que se encuentra ligada a la condición de las rótulas, que es el diámetro interior del anillo de la rótula, se escoge

como diámetro para el eje 5/16" que equivale a (7.9mm), el esquema de la revolución es igual al que se planteó para el eje de antebrazo.

Como el eje que se propone es igual al eje del antebrazo diseñado de forma previa, la magnitud del peso es semejante, 0.038 Newtons.

8.4.3.6. Diseño del Brazo

El brazo es el primer eslabón de cada cadena cinemática serial, que parte del actuador rotacional, tomando como referencia la distancia crítica hallada mediante la ayuda del algoritmo de MatLab del espacio de trabajo, al igual que todas las medidas definidas como importantes o críticas, se diseña la geometría del eslabón.

La condición más importante que esta pieza debe cumplir es que debe tener el menor peso posible, para ello se escoge el acrílico un material con una densidad baja y se propone una geometría poco prismática con el fin de evitar el peso que genere torque para el motor, además el mecanizado de la pieza es bastante sencillo, se hace por medio de corte con láser, un trabajo que permite hacer figuras geométricas complejas y con buena precisión, en la Figura 47 se observa la forma de la pieza.

Figura 47. Brazo Sólido



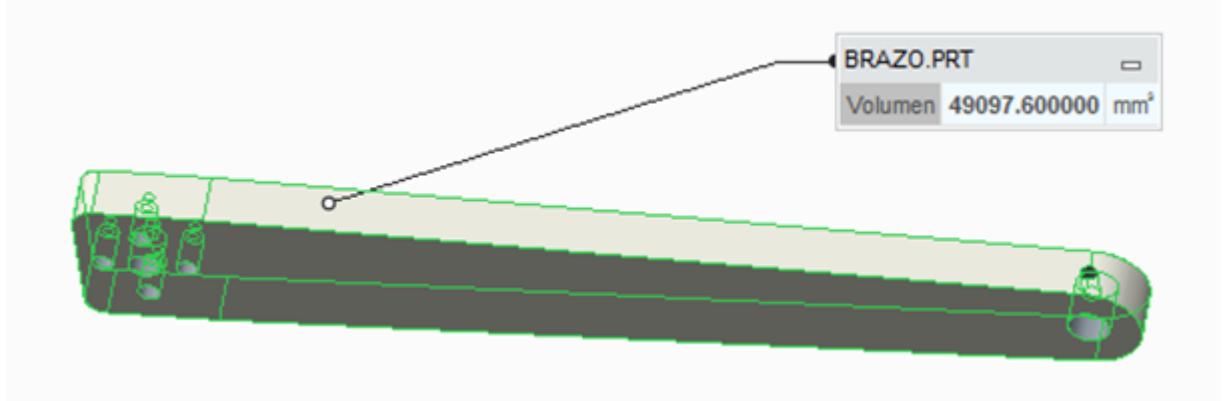
Fuente: Los autores

El espesor del acrílico es de 10mm por temas comerciales, además es necesario colocar un prisionero con el fin de poder graduar y ajustar el eje que se diseño de forma previa, la sustentación teórica del comportamiento de la pieza se muestra a continuación:

Es eslabón llamado Brazo en un extremo se encuentra fijo al motor y se puede concebir para términos de diseño y análisis estático como si se encontrara fijo en ese punto, en su otro extremo la pieza se encuentra libre y soporta una fuerza puntual que fue llamada en anterioridad como Rcy con una magnitud de 7.702N el diseño.

El peso del brazo se halla a partir del volumen, el cual se muestra en la Figura 48.

Figura 48. Volumen Brazo



Fuente: Los autores

El acrílico tiene una densidad de $1,18 \text{ g/cm}^3$, el volumen de la pieza es de 49.097cm^3 , por lo cual:

$$\text{Masa Brazo} = 1,18 \text{ g/cm}^3 * 49.097\text{cm}^3$$

$$\text{Masa Brazo} = 57.93 \text{ g} = 0.05793 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso Brazo} = 0.05793 \text{ Kg} * 9.81\text{m/s}^2$$

$$\text{Peso Brazo} = 0.57\text{N}$$

8.4.3.7. Soportes de Fijación Servomotores

A partir del plano de los servomotores Dynamixel AX-12, se plantean unos soportes que tienen el fin de fijar y mantener firme los servomotores a la base fija, en la Figura 49 se propone un diseño para la definir la geometría del soporte.

Figura 49. Soporte Servomotores



Fuente: Los autores

El material del soporte es acero SAE 1020, la pieza irá fija a la base mediante dos tornillos dispuestos en las cavidades ilustradas en la Figura 49 cada tornillo soporta el peso de todo el sistema analizado hasta el momento dividido entre seis, al ser dos tornillos por cada soporte.

Peso de la cadena cinemática serial: $3.9N + 0.57N = 4.47N$

Peso del servomotor= $0,0566\text{Kg} * 9.81\text{m/s}^2 = 0.555\text{N}$

Masa del Soporte= $7850 \text{ kg/m}^3 * 5416.66\text{mm}^3 = 0.0425 \text{ Kg}$

Peso del Soporte= $0.0425 \text{ Kg} * 9.81\text{m/s}^2$.

Peso del Soporte= 0.4171Newtons

Peso total de una cadena cinemática serial completa= 5.442N

Peso que soporta cada tornillo =2.72N

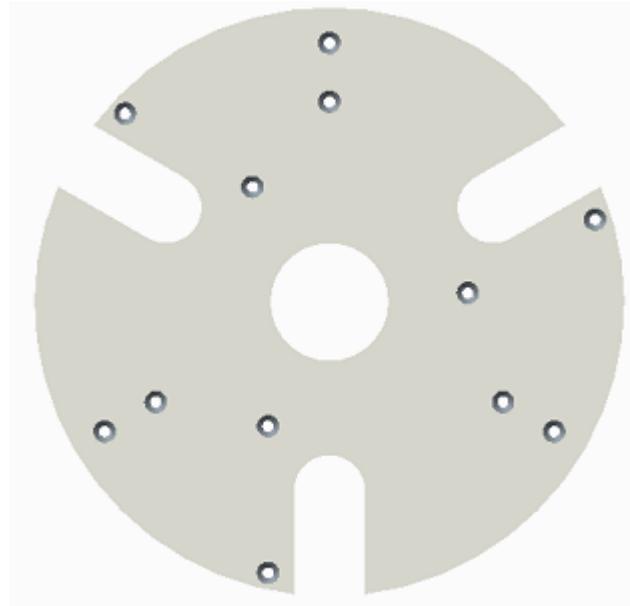
Se usan tornillos de 3/16 UNC.

8.4.3.8. Diseño de la base fija

La base fija es la pieza encargada de sostener los soportes, por medio de tornillos, y por ende soportará todo el peso relacionado con las tres cadenas cinemáticas seriales, para la facilidad de mecanizado se propone para trabajar el acrílico, la pieza no estará sometida a fuertes vibraciones ni temperaturas, por lo cual este es un material que en principio serviría para realizar la pieza, además el proceso de corte con láser permite diseñar figuras con geometrías complejas y son fáciles de realizar

Para definir el tema de la geometría de la base fija del robot Delta, en principio se propone que sea una pieza redonda, que debe tener el espacio en su geometría para que los brazos del robot Delta puedan moverse de forma libre, tal que no hayan interferencias, además se propone por reducir el peso retirar un circulo de material del centro de la figura, en ese orden de ideas la geometría que se propone es:

Figura 50. Base Fija

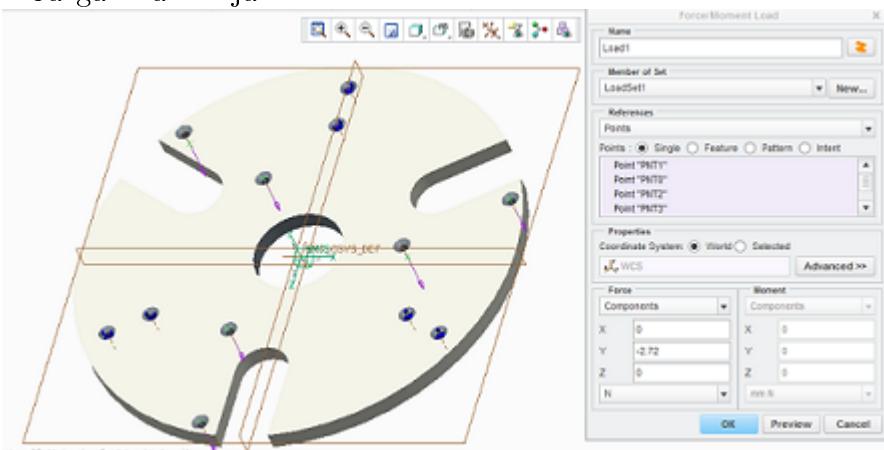


Fuente: Los autores

Los slots se colocan con el fin de dar libertad completa a los brazos del robot Delta, para el tema del espesor se hace referencia al sector comercial, además de la justificación de que soporta las cargas mecánicas que va a soportar.

Para ello se selecciona una medida comercial (10mm), se realiza la pieza en un software CAD, y mediante un módulo CAE se hace análisis del desplazamiento y esfuerzo que genera en la pieza la configuración de las cargas y apoyos.

Figura 51. Cargas Base Fija

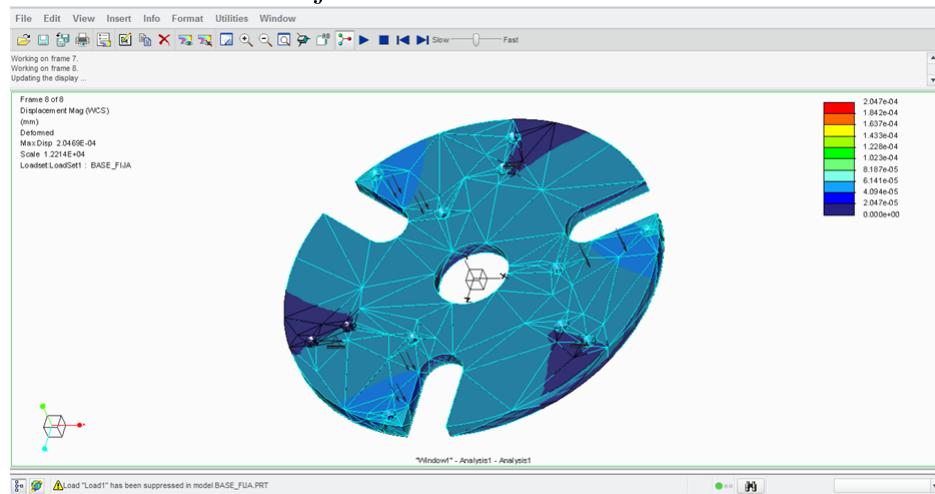


Fuente: Los autores

En la Figura 51 se observa la configuración para definir el peso que se coloca donde iría cada tornillo, además de las restricciones a las que se encuentra sometida de la pieza, que básicamente es de donde se encuentra soportada o apoyada que es en tres partes, distribuidas a 120° .

A continuación se realiza una simulación para observar el comportamiento de la pieza en las condiciones establecidas.

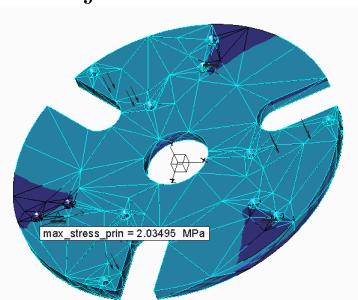
Figura 52. Simulación Base Fija



Fuente: Los autores

En la Figura 52, se observa el comportamiento de la pieza sometida a las cargas establecidas, de donde se puede sacar como información relevante el máximo desplazamiento que genera la configuración de las cargas, el cual es de $2,04^{-4}$ milímetros, cifra que no es significativa, pero que puede inducir un rediseño del espesor de la pieza.

Figura 53. Esfuerzo máximo base fija



Fuente: Los autores

Como se aprecia en la figura 53, el esfuerzo máximo al que está expuesta la base fija es de 2,034 MPa, el esfuerzo admisible del acrílico en flexión es de 11 MPa, por lo cual, el factor de seguridad simple es de:

$$N = 5,4$$

El espesor de 10 mm escogido en cuanto a la relación establecida, es una dimensión que está por encima, pero hay un factor que no permite que se designe una cota menor para esta dimensión y es el tema del maquinado, para efectos prácticos es mejor tener una pieza robusta que permita hacer operaciones de desbaste o corte sin algún problema, como pandeo, fatiga, entre otros.

8.4.3.9. Diseño Estructura de Soporte

Una vez concluido el diseño de las partes más importantes del robot Delta, sin desestimar la funcionalidad de las restantes, se procede a diseñar la estructura que va a soportar el Robot Delta, sin ninguna condición de diseño en cuanto a forma, material, cantidad de piezas, la idea es encontrar una configuración de vigas que soporte el peso del robot Delta y sus posibles movimientos bruscos, en principio como primicia subjetiva se propone que la configuración de la estructura esté ligada a la condición de geometría y simetría que el robot Delta posee, esto con el fin de distribuir las cargas de forma que el stress producido por las fuerzas sea soportado sin inconvenientes.

La configuración de vigas para la estructura que se propone se puede apreciar en la Figura 54.

La finalidad que tiene el diseño propuesto es que la base fija, junto con las tres cadenas cinemáticas seriales reposen sobre la estructura, esto con el fin de aprovechar el área de contacto entre la base fija y las vigas, evitando así que los tornillos de sujeción soporten todo el peso quedando sometidos a tensión constante, con el diseño solo cumplen la función de evitar el movimiento relativo entre las piezas.

El material que se escoge para la fabricación de la estructura del robot Delta es el acero SAE 1020, por su facilidad de adquisición, bajo coste, propiedades mecánicas que lo hacen un material interesante para una estructura de este tipo.

Figura 54. Vigas Estructura



De todos los perfiles comerciales existentes en este tipo de material, por experiencia se escoge el cuadrado, con el fin de hacer ágil el tema del mecanizado, la instalación y facilidad de adquisición sumado al costo.

En principio se realiza una estructura con la configuración en material y perfil mencionado anteriormente, tomando como medida del perfil $\frac{3}{4}'' \times \frac{3}{4}''$ calibre No12 se halla el peso que soporta cada cadena de vigas y se analiza el comportamiento de una, con el fin de concluir o aproximar las medidas más adecuadas para el diseño, en la Figura 55, se detalla la asignación de cargas y restricciones de una de las tres cadena de vigas.

El peso que soporta cada configuración de vigas está dado por:

Peso total de una cadena cinemática serial completa = 5.442 N

A ese valor es necesario sumarle un tercio del peso de la base fija, el cual corresponde a:

Se halla el peso, con el dato del volumen y el peso específico $417578.12 \text{ mm}^3 = 0.00041757812 \text{ m}^3$

Peso de la base Móvil = $0.00041757812 \text{ m}^3 * 11673.9 \text{ N/m}^3$

Peso de la base Móvil = 4.87 Newtons

$$\text{Peso total} = 5.442\text{N} + (4.87\text{N}/3) = 7.06 \text{ N}$$

Figura 55. Cargas Estructura

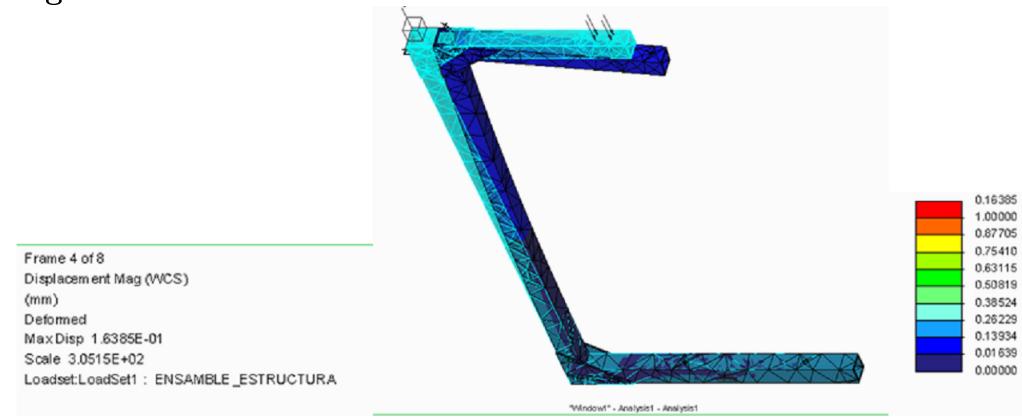


Fuente: Los autores

Una vez establecidas las condiciones de carga y restricciones de desplazamiento se procede a hacer un análisis estructural y corroborar el comportamiento de la viga en sus condiciones de servicio.

En la Figura 56, se aprecian los resultados del análisis en cuanto al máximo desplazamiento generado en las condiciones establecidas.

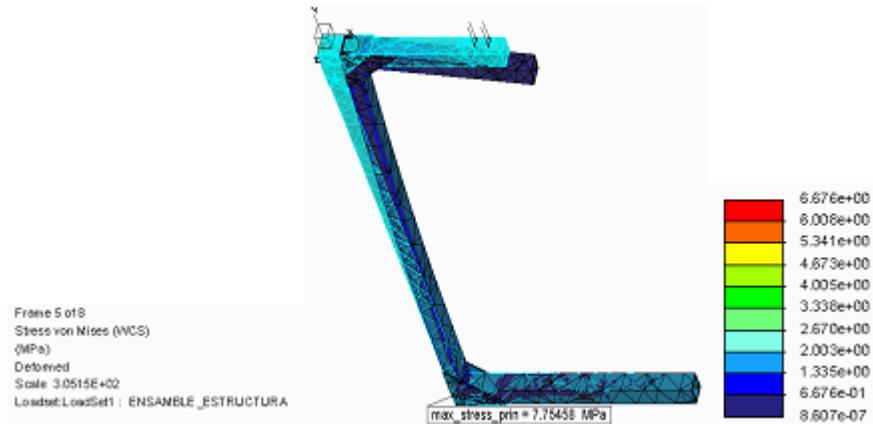
Figura 56. Resultados Estructura



Fuente: Los autores

El máximo desplazamiento que generan las condiciones establecidas para el modelo de vigas es de 0.163 mm, valor que se ajusta a las necesidades de diseño estructural, al ser un valor admisible para el comportamiento.

Figura 57. Esfuerzo máximo estructura



Fuente: Los autores

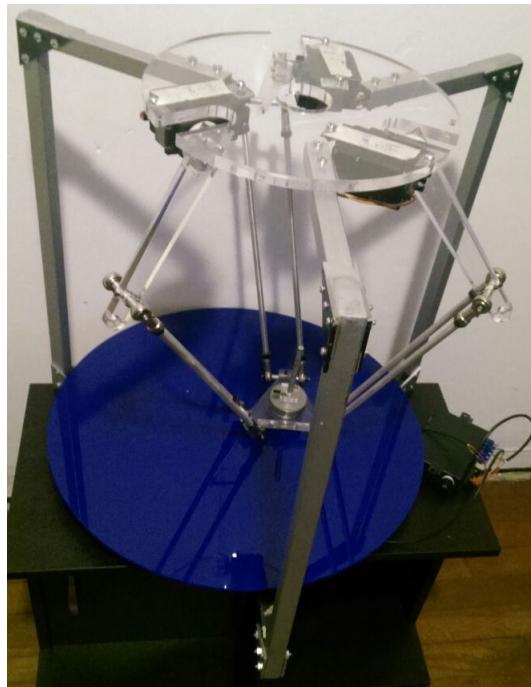
En la imagen relacionada al diagrama del comportamiento del esfuerzo de la viga para las condiciones establecidas, cumple con los requisitos de diseño, la escala de la medida está en Mega Pascales y el valor máximo que la estructura soporta es de 7.75458 Mega Pascales, teniendo en cuenta que el material más crítico es el acrílico, se compara este esfuerzo, con el esfuerzo admisible de este material y se saca el factor de seguridad: El esfuerzo admisible del acrílico es de 13Mpa a compresión, por lo tanto el factor de seguridad es de:

$$N=1,8.$$

Por lo cual las medidas establecidas para el diseño de la parte estructural del robot se determinan como admisibles, adecuadas.

Con esto se finaliza el diseño mecánico del robot Delta y se procede a la construcción del robot, cuyo resultado se evidencia en la siguiente imagen.

Figura 58. Robot Delta Final



Fuente: Los autores

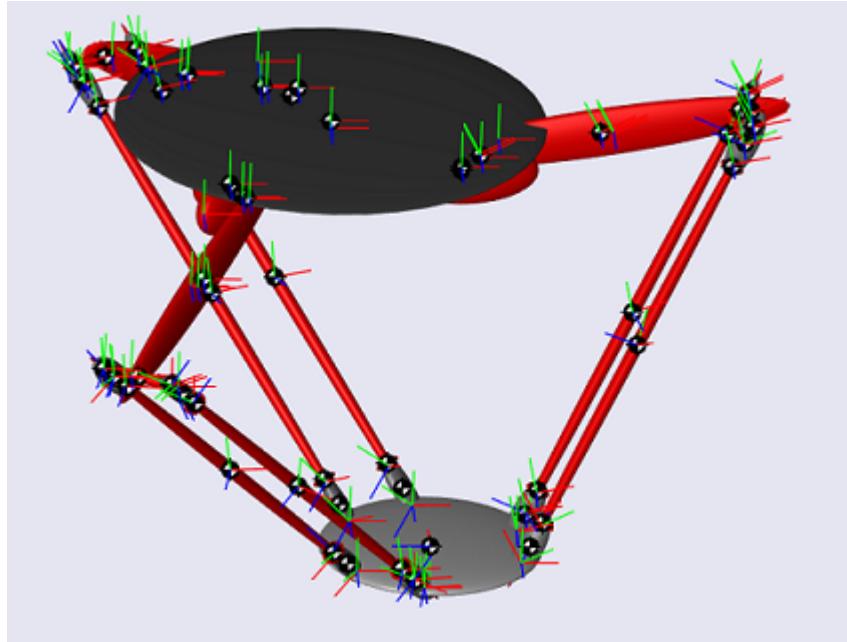
8.4.4. Selección de Motores

8.4.4.1. Torque motores (Holding Torque)

A partir de la herramienta SimMechanis de SimuLink se realiza un análisis del comportamiento del torque de los motores en el tiempo, para ello, se desarrollan varias trayectorias que permitan hacer comparaciones a fin de encontrar el máximo valor del torque desarrollado por los motores.

Partiendo del ensamble creado en el software de diseño mecánico Creo Parametric, se realiza la correspondiente exportación del modelo final a SimMechanics Firts Generation.

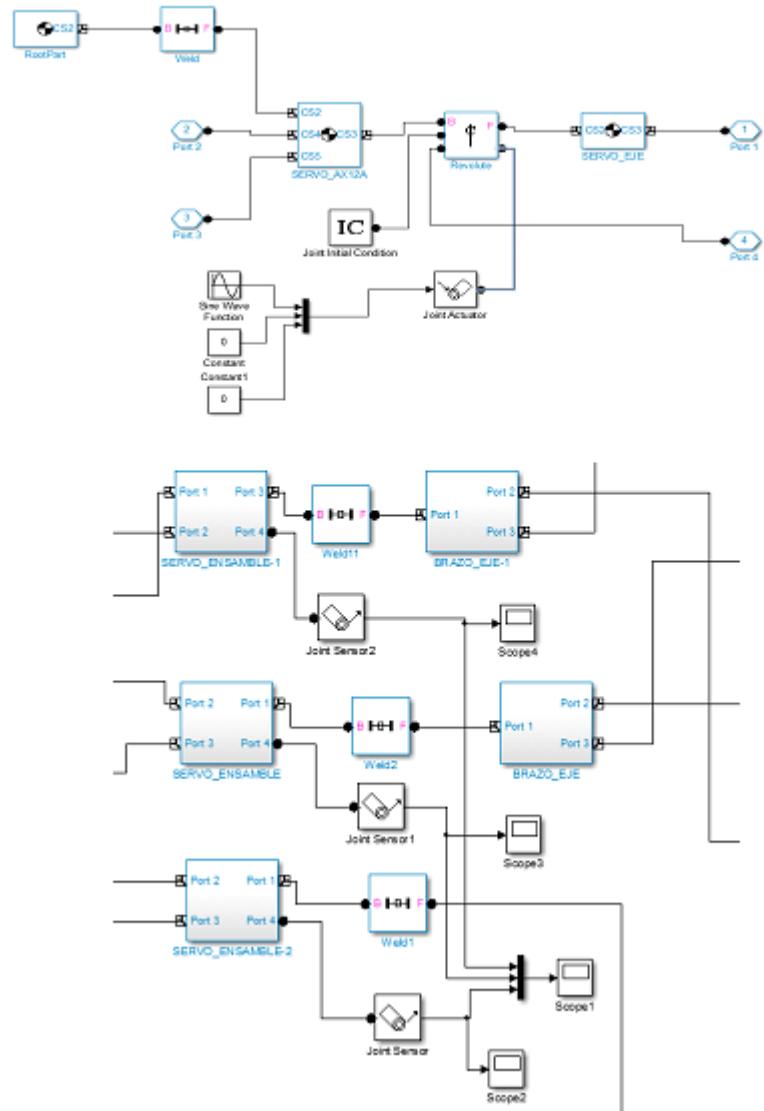
Figura 59. Robot en SimMechanics



Fuente: Los autores

Una vez se realizó la exportación se procede a ajustar el ensamblaje en SimMechanics con el fin de generar los movimientos del robot Delta y poder supervisar y registrar los datos censados, para ello se colocan los sensores de torque en el lugar indicado y se generan los movimientos planeados.

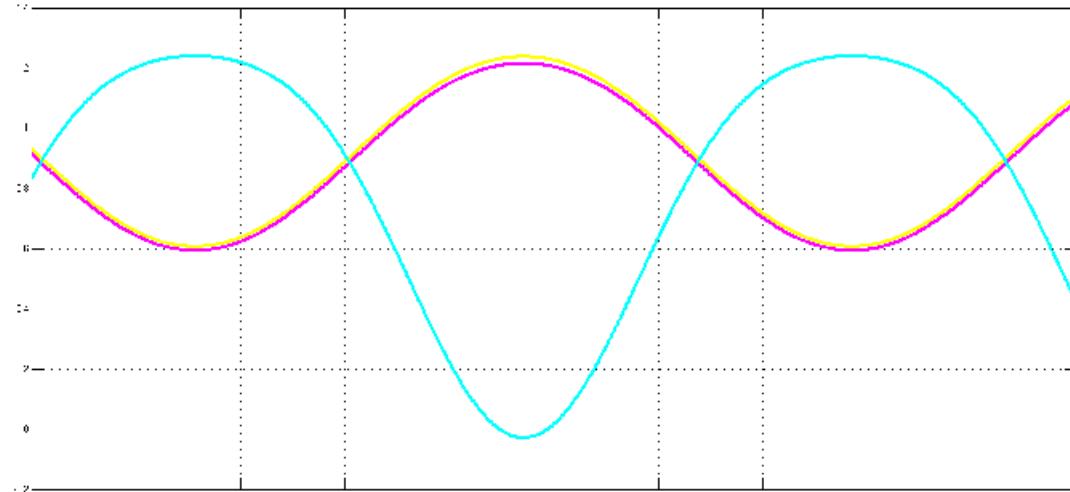
Figura 60. Ajustes Simulink



Fuente: Los autores

8.4.4.2. Análisis de los Torques en Función de las Trayectorias

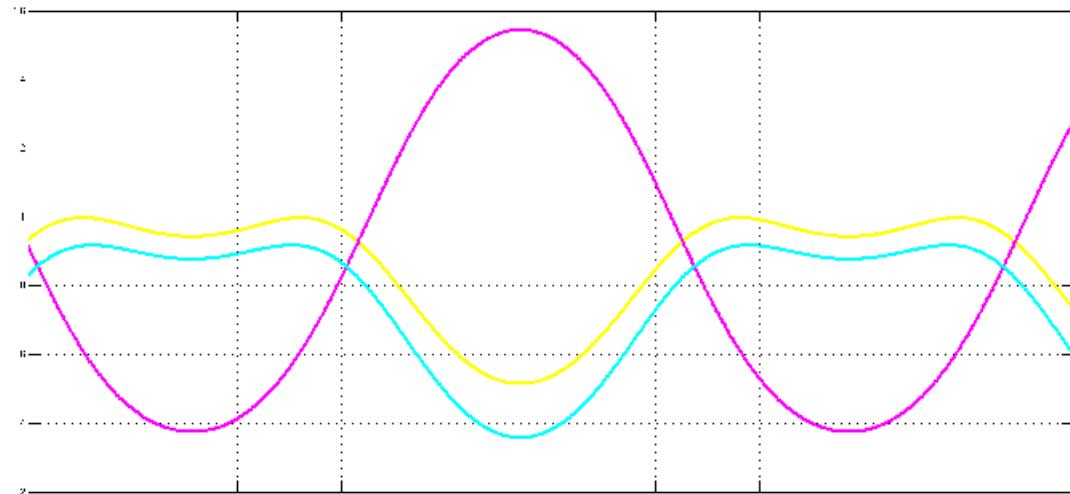
Figura 61. Movimiento un servomotor



Fuente Los autores

Máximo Valor 1,28 Nm

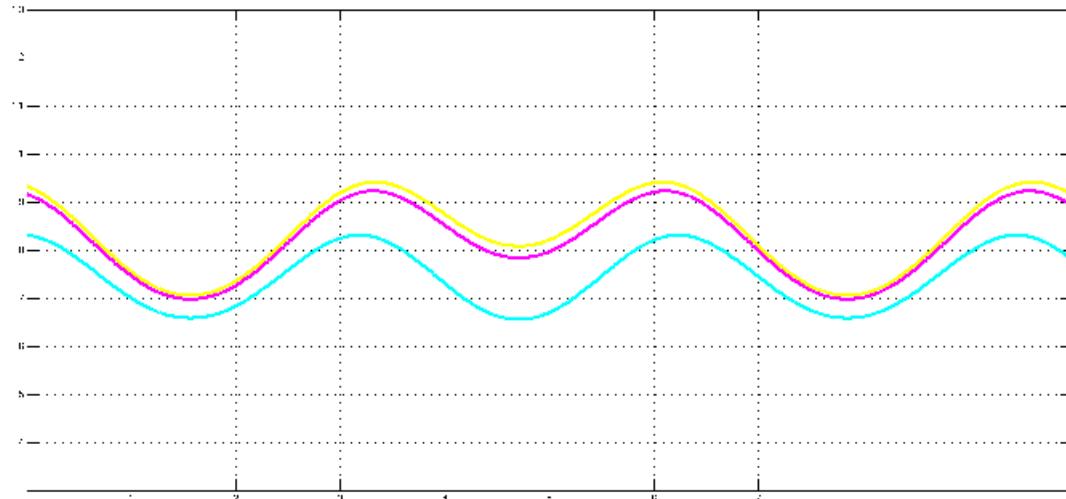
Figura 62. Movimiento dos servomotores



Fuente: Los autores

Máximo Valor: 1,46 Nm

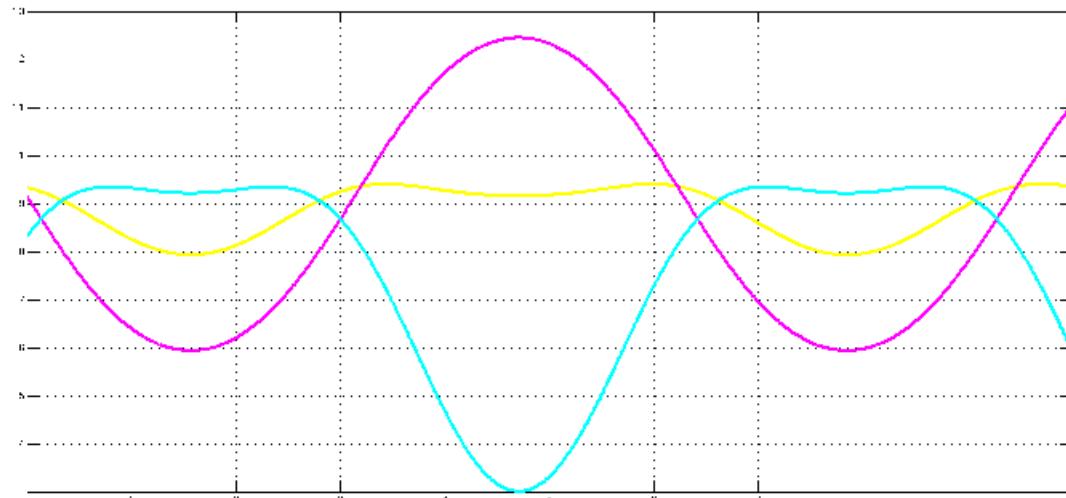
Figura 63. Movimiento tres servomotores



Fuente: Los autores

Máximo Valor: 0,942 Nm

Figura 64. Movimiento tres servomotores diferente trayectoria



Fuente: Los autores

Máximo Valor: 1,24 Nm El máximo valor que puede llegar a alcanzar un servomotor en su requerimiento de torque es de 1,46 Nm.

8.4.5. Proceso de Selección

Los tres servomotores que son parte de esta configuración de robot paralelo, son los actuadores que va a permitir el movimiento de la base móvil, las condiciones de diseño de estos elementos van a estar sujetas a la precisión del robot, definida dentro de las especificaciones que debe cumplir el robot, las solicitudes mecánicas, para este caso el torque que necesita para mover el sistema mecánico junto con su elemento final, que para el tema de la impresión 3D sería un extrusor que permitiría realizar el proceso de impresión, por último el factor de la velocidad, que dependerá de las condiciones de impresión relacionadas en los parámetros de diseño de acuerdo al enfoque del robot.

Para efectos de control del robot Delta la condición de selección de los servomotores va a estar ligada a la oferta del mercado para las series de servomotores Dynamixel, en donde se escogerá aquel que se ajuste a la condiciones de diseño teórico y para la implementación, la posición subjetiva de elección del proveedor se da ya que el software que se usará para el procesamiento de datos será MatLab, el cual permite controlar los motores por medio de comunicación serial.

Para calcular la precisión angular que deben tener los servomotores, con el fin de obtener una determinada precisión cartesiana, es necesario acudir al cálculo de la cinemática directa e inversa, algoritmo matemático que permite conocer las variables cartesianas (x, y, z), en coordenadas ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$), y viceversa. El cálculo de la precisión de los servomotores se encuentra delimitado por la especificación de rango definida en los objetivos, como el robot Delta enfocado a la impresión 3D es un prototipo inicial, con el cual los autores piensan tomar el desarrollo como base para la creación de empresa, es importante que la máquina que se diseñe, se acerque a los parámetros y prestaciones de las impresoras comerciales de una gama media.

La precisión planteada para el cálculo de los motores que permitirán acercarse a la resolución de las impresoras comerciales es de 0mm a 0.5mm, el cual es un margen de precisión bueno que puede verse involucrado en aplicaciones de mediana precisión. Partiendo del modelo matemático de la cinemática del robot Delta comprobado mediante el software MatLab, se hacen pruebas que permitan encontrar un valor que se encuentre dentro de la especificación de rango de precisión definida (0mm – 5mm) y que además de ello permita la adquisición del servomotor de forma comercial.

Se debe tener en cuenta que para el tema relacionado al control de los servomotores se necesitan que sean marca Dynamixel, por temas de comunicación y fácil enlace mediante

una tarjeta a un PC, cuestiones que serán presentadas en el diseño del sistema de control, basada en esta premisa, la selección del motor debe hacerse de acuerdo con el catálogo del proveedor especificado y a partir de las especificaciones técnicas se filtran las características más importantes de cada motor, en este caso la resolución (resolution), esto con el fin de realizar una prueba que permita establecer el indicado para los fines de diseño establecidos.

Figura 65. Catálogo Dynamixel

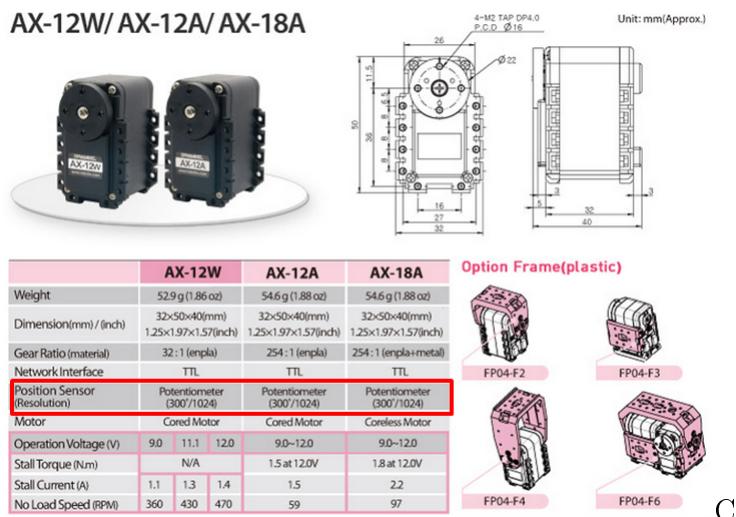


Fuente: Catálogo ROBOTIS Company

En la Figura 65 se aprecia la oferta que la tienda ROBOTIS tiene en su página web, en cuestión de servomotores de marca Dynamixel, se pueden observar la serie AX (12W-12A-18A), la serie MX (28T-28R), la serie RX (24F-28), la serie MX (64T-64R), la serie RX(64), la serie MX (106T-106R) y la serie EX (106+).

El primer paso consiste en hacer las pruebas para cada motor, con el fin de establecer la precisión del prototipo de robot Delta en función de la precisión de cada servomotor; para el caso de la serie AX (12W-12A-18A), los valores correspondientes a la precisión se pueden detallar en la Figura 66.

Figura 66. Catálogo Dynamixel



Fuente: Catálogo ROBOTIS Company

Dentro de la Figura 66 se encuentran las especificaciones técnicas de los servomotores de la serie AX (12W-12A-18A), para el cálculo y la selección la medida crítica es la que proporciona información sobre la resolución del servomotor, que se encuentra encerrada por un rectángulo rojo, la casilla se refiere a lo siguiente: Para las tres versiones de ese modelo de motor se observa que la resolución es de 300° en 1024, lo que significa que la precisión está dada por el cociente entre estos dos datos.

$$\text{Precisión} = (300^\circ)/1024 = 0.2929^\circ$$

Teniendo el valor de la variación mínima del eje del servomotor expresada en grados, se procede a realizar el cálculo para encontrar la relación de esa posición angular con respecto a la posición cartesiana (x, y, z), para ello se usa la cinemática directa, en donde se ingresan las coordenadas articulares, y se obtienen las coordenadas cartesianas. Se parte del programa en MatLab, en el cual se encuentran las medias del robot que se calculó para el volumen de trabajo especificado. Se define un valor inicial para cada coordenada articular el cual va a ser cero, entonces:

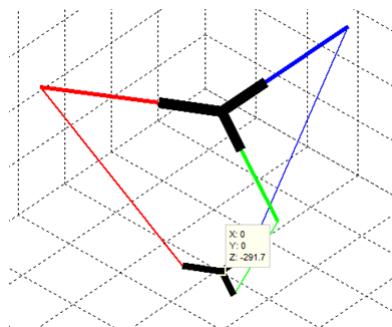
$$\text{Teta1}=0; \text{Teta2}=0; \text{Teta3}=0;$$

Donde:

$\text{Teta1}, \text{Teta2}, \text{Teta3}$, son el ángulo en grados para cada servomotor respectivamente.

Para los valores establecidos inicialmente el resultado de las coordenadas cartesianas se evidencian en la Figura 67.

Figura 67. Demostración 1



Fuente: Los autores

Donde :

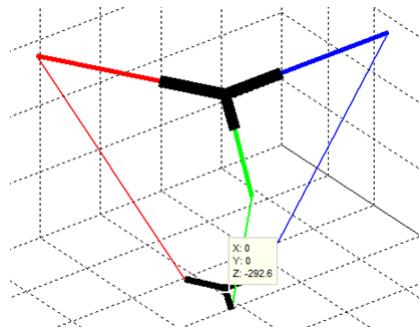
$$X_1=0; Y_1=0; Z_1= 291.6830 \text{ mm}$$

Ahora se definen nuevos valores para las coordenadas articulares, teniendo en cuenta la resolución de este servomotor es de 0.2929° , la modificación debe hacerse para los tres servomotores, esto con el fin de que solo cambie una coordenada y las otras dos se mantengan en su valor anterior, así se garantiza la mínima variación que puede tener el prototipo de robot Delta en una línea recta.

Teta1=0.2929; Teta2=0.2929; Teta3=0.2929;

Para los valores establecidos inicialmente el resultado de las coordenadas cartesianas se evidencian en la Figura 68.

Figura 68. Demostración 2



Fuente: Los autores

Donde:

$$X_2=0; Y_2=0; Z_2= 292.5844 \text{ mm}$$

Para establecer la resolución cartesiana equivalente a la resolución de los servomotores, solo se necesita encontrar la diferencia entre los valores encontrados, que para este caso la variante se encuentra en el eje Z, entonces se procede a hacer la resta.

$$Z_2-Z_1 = 292.5844 \text{ mm} - 291.6830 \text{ mm}$$

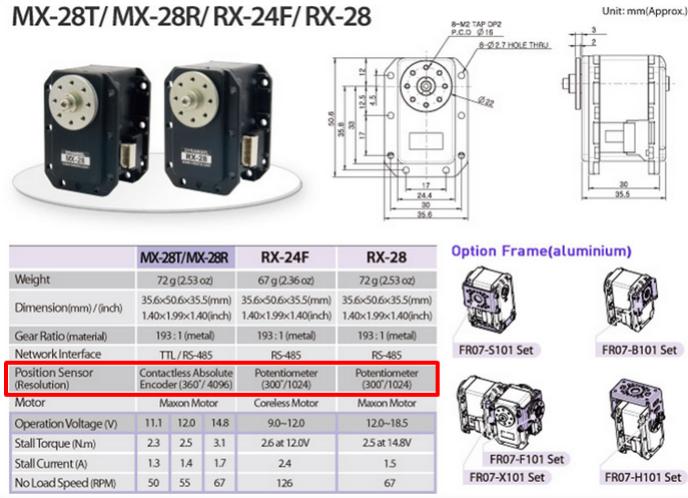
$$Z_2-Z_1 = 0.90 \text{ mm}$$

Esto implica que la precisión del prototipo de robot Delta sería de 0.90 mm si se usara un servomotor de la serie AX (12W-12A-18A), por lo cual para efectos de diseño no sirve, pero se contempla la posibilidad de usarlos para la demostración experimental y física de la funcionalidad y correlación entre la teoría y la práctica en el prototipo que se construirá.

Al no ser útil el servomotor al que se le ha hecho la prueba teórica, se procede a escoger la siguiente serie de servomotores, Figura 69.

Figura 69. Catálogo Dynamixel

MX-28T/ MX-28R/ RX-24F/ RX-28



Fuente: Catálogo ROBOTIS Company

Dentro de la Figura 69 se encuentran las especificaciones técnicas de los servomotores de la serie MX (28T-28R) y la serie RX (24F-28), pero el objetivo de diseño busca obtener la mayor resolución milimétrica por lo cual para el cálculo y la selección la medida más importante es la de la serie MX (28T-28R); para el interés de alcanzar el objetivo planteado, la serie MX (28T-28R) cambia respecto de las anteriores AX (12W-12A-18A) y además de ello la serie RX (24F-28) coincide en la resolución de los servomotores de la serie AX (12W-12A-18A), se observa que la resolución angular de interés es de 360° en 4096, lo que significa que la precisión está dada por el cociente entre estos dos datos.

$$\text{Precisión} = (360^\circ)/4096 = 0.087^\circ$$

Se realiza el mismo procedimiento que se hizo en la anterior serie, del cual se usan los siguientes datos:

Se define de igual forma los ángulos en una posición inicial.

$$\text{Teta1}=0; \text{Teta2}=0; \text{Teta3}=0$$

Para lo cual se sabe que:

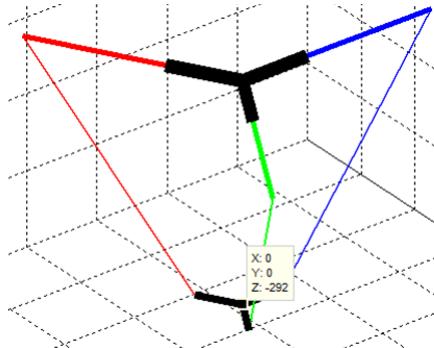
$$X1=0; Y1=0; Z1= 291.6830 \text{ mm}$$

Ahora se definen nuevos valores para las coordenadas articulares, teniendo en cuenta la resolución de estos servomotores, es de 0.087° , la modificación debe hacerse para los tres motores, esto con el fin de que solo cambie una coordenada y las otras dos se

mantengan en su valor anterior, así se garantiza la mínima variación que puede tener el robot en una línea recta.

Teta1=0.087; Teta2=0.087; Teta3=0.087; Para los valores establecidos inicialmente el resultado de las coordenadas cartesianas se evidencian en la Figura 70.

Figura 70. Demostración 3



Fuente: Los autores

Donde:

$$X3=0; Y3=0; Z3= 291.9504 \text{ mm}$$

Para establecer la resolución milimétrica cartesiana equivalente a la resolución angular de los servomotores, solo se necesita encontrar la diferencia entre los valores encontrados, que para este caso son los del eje Z, que es el que presenta variaciones.

$$Z3-Z1 = 291.9504 \text{ mm} - 291.6830 \text{ mm}$$

$$Z3-Z1 = 0.26 \text{ mm}$$

El valor de 0.26 mm se encuentra dentro del rango que se especificado de (00mm-0.5mm), para el cálculo y selección del motor en términos de diseño, por lo cual esta sería una opción recomendable en términos de selección de los servomotores por precisión, ya que se ajusta al planteamiento inicial, ya dependerá de factores mecánicos y eléctricos como el torque del servomotor, la velocidad angular, la tensión de alimentación, la corriente de consumo, entre otros, para establecer si se elige o no. Con el fin de encontrar la mejor opción en el mercado para el tema que se está evaluando (resolución), se procede a revisar las demás series de servomotores Dynamixel comercializadas por ROBOTIS, en la Figura 71 se evidencian las especificaciones técnicas para las series MX (64T-64R), la serie RX(64).

Figura 71. Catálogo Dynamixel
RX-64/ MX-64T/ MX-64R

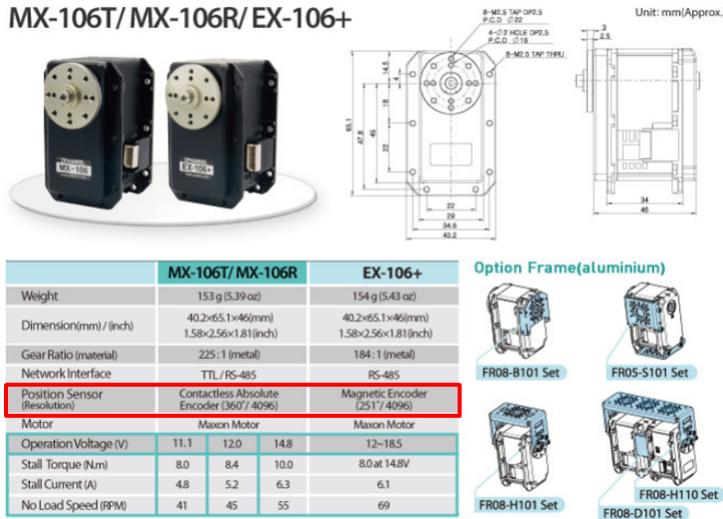


Fuente: Catálogo ROBOTIS Company

La información encerrada en el recuadro rojo de la Figura 71 hace referencia a la resolución de las series de servomotores MX (64T-64R), la serie RX(64), en las cuales se evidencia que la serie MX (64T-64R) cuenta con una resolución de 0.087° , según evaluaciones y cálculos anteriores, la serie RX(64) cuanta con una precisión de 0.2929° , según evaluaciones y cálculos anteriores; por lo cual solo habría una opción mas para escoger dentro de los criterios mecánicos y eléctricos, que sería la serie MX (64T-64R), ya que se evidenció que con una resolución angular de 0.087° la correspondencia con la resolución milimétrica del robot es de 0.26 mm, por otro lado la serie RX(64) se puede dejar planteada junto con la serie AX (12W-12A-18A), para el tema relacionado con la implementación de la prueba en el prototipo que se construirá, el cual se definirá con algunos parámetros de definidos para la cuestión mecánica y eléctrica.

Las últimas series dentro de la oferta de servomotores Dynamixel en la tienda ROBOTIS, se evidencian en la Figura 72, las especificaciones técnicas se las series MX (106T-106R) y la EX (106+).

Figura 72. Catálogo Dynamixel
MX-106T/MX-106R/EX-106+



Fuente: Catálogo ROBOTIS Company

En el recuadro rojo de la Figura 72 se evidencia la resolución angular para cada serie de servomotores, en donde la serie MX (106T-106R) cuenta con una resolución angular de 0.087° lo que equivale a una resolución milimétrica de 0.2929° , por lo cual en esta instancia seria una opción mas para la selección del servomotor en el diseño dentro del rango de (00mm-0.5mm); la serie EX (106+) a diferencia de la anterior mencionada presenta una variación el la resolución angular, por lo cual se procede a evaluar la viabilidad en términos de precisión, para este caso el cociente que define la mínima variación angular del servomotor en términos de precisión es los 251° entre 4096, lo que daría:

$$\text{Precisión} = (251^\circ)/4096 = 0.061^\circ$$

Evidentemente la resolución angular de esta serie de servomotores Dynamixel EX (106+) es mayor comparada con todas las anteriores mencionadas, por lo cual se realiza la prueba que para las anteriores fue ejecutada se parte de las condiciones iniciales en donde:

$$\text{Teta1}=0; \text{Teta2}=0; \text{Teta3}=0;$$

Para lo cual se sabe que:

$$X1=0; Y1=0; Z1= 291.6830 \text{ mm}$$

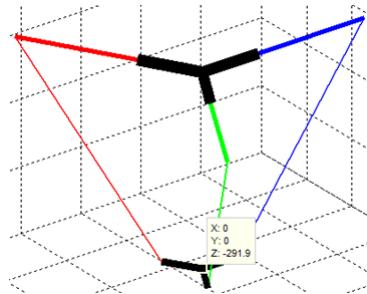
Ahora se definen nuevos valores para las coordenadas articulares, teniendo en cuenta la resolución de estos servomotores EX (106+), es de 0.061° , la modificación debe hacerse

para los tres motores, esto con el fin de garantizar el cambio en una coordenada y las otras dos se mantengan en su valor anterior.

Teta1=0.061; Teta2=0.061; Teta3=0.061

Para los valores establecidos inicialmente el resultado de las coordenadas cartesianas se evidencian en la Figura 73

Figura 73. Demostración 4



Fuente: Los autores

Donde:

X4=0; Y4=0; Z4= 291.8705 mm

Para establecer la resolución milimétrica cartesiana equivalente a la resolución angular de los servomotores EX (106+), solo se necesita encontrar la diferencia entre los valores encontrados, que para este caso son los del eje Z, que es el que presenta variaciones.

$$Z4-Z1 = 291.8705 \text{ mm} - 291.6830 \text{ mm}$$

$$Z4-Z1 = 0.1875 \text{ mm}$$

La resolución milimétrica que el robot Delta tendría si se implementan los servomotores EX (106+) de la serie dynamixel, es una atractiva medida para efectos de impresión 3D, la selección del motor dependerá de este y otros factores de diseño.

Para concluir en la Tabla 1 se establecen las posibles opciones que se pueden implementar, tanto para el diseño como para el prototipo que se construirá.

Tabla 1. Servomotores

SERVOMOTORES PARA PROTOTIPO (PRECISION CARTESIANA > 0,5 mm)	SERVOMOTORES PARA PROTOTIPO (PRECISION CARTESIANA < 0,5 mm)
AX (12W-12A-18A)	MX (106T) - EX (106+)
RX (24F-28)	MX (28T-28R)
RX (64)	MX (64T-64R)

Fuente: Los autores

De acuerdo a los resultados anteriores es evidente que el uso de cualquiera de las referencias de la columna derecha da cumplimiento a los objetivos fijados inicialmente en cuanto a precisión y torque, aun así, no se optó por su aplicación debido al alto costo y dificultad de adquisición, sin embargo si se quiere implementar el robot como impresora 3D o cualquier otra aplicación que requiera de las características indicadas y como parte de algún trabajo posterior, se recomienda la utilización de alguna de estas referencias.

Para la implementación física del prototipo, conociendo los requerimientos del torque necesario y que su utilización será frecuente en el laboratorio, se optó por la adquisición de servomotores comerciales y robustos, de tal forma que aunque ofrecen baja resolución permiten a los usuarios la realización de prácticas con cargas superiores a las calculadas y de forma continua, por lo cual se instalaron servomotores Tower Pro 9805BB controlados por medio de las salidas PWM de una tarjeta Arduino Uno R3 conectada al puerto USB de un computador.

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. Arduino puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada de toda una gama de sensores y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores.

El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de

conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software (p.ej. Flash, Processing, MaxMSP). Arduino cuenta con una serie de librerías de programación que facilitaran y simplificaran el código de control de los motores, una de ellas y la implementada en el proyecto es la librería Servo, que permitirá controlar los tres servomotores al tiempo.

La comunicación con Matlab se realiza por medio de un puerto USB, este se trabaja como un puerto serial virtual, es decir, aunque el Arduino esté conectado al computador por medio de un puerto USB realmente este se comunica con Matlab mediante comunicación serial. Específicamente el Arduino a utilizar será el Arduino Uno R3, esta placa cuenta con un microcontrolador ATmega328 que ofrece UART TTL (5V) de comunicación en serie, disponible en los pines digitales 0 (RX) y 1 (TX) 14 entradas y salidas digitales (6 de las cuales pueden ser utilizadas como PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de 16 MHz, conexión USB y pulsador de reset. Utilizando la conexión USB del Arduino y del computador se realiza la comunicación con los motores.²

8.5. DISEÑO ELÉCTRICO

El cálculo del circuito para el uso de servomotores estandar y su diagrama de conexión es muy sencillo, básicamente busca determinar las características mínimas con las que debe contar la fuente de alimentación.

Los servomotores utilizados en la implementación física del prototipo (Tower Pro 9805BB) cuentan con las siguientes características:

Dimensiones: 66*30.2*64.4mm

Torque: 20KG/cm (4.8V) 25KG/cm (6V)

Velocidad: 0.20 sec / 60° (4.8V) 0.16sec/60° (6V)

Voltage: 4.8V a 7.2 V

Corriente máxima: 2200 mA

Peso: 160 Gramos

Rango de Temperatura: 0Cº a 55ºC

²Disponible en internet: <http://www.arduino.cc/es/pmwiki.php?n=>

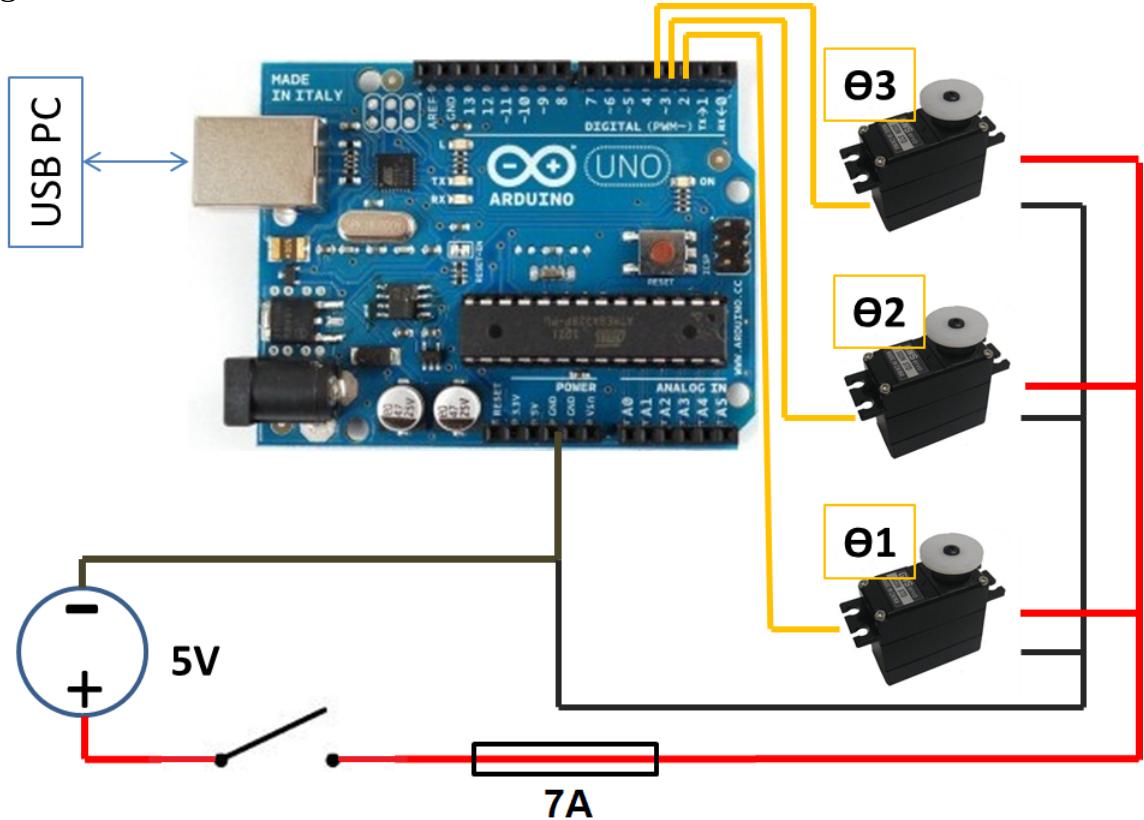
Partiendo de las características anteriores y de los valores de tensión comerciales de las fuentes se determinan 5V como tensión de uso.

De acuerdo al valor de corriente máxima del servomotor (2,2 A) y a la utilización de 3 motores conectados en paralelo, se determina la corriente máxima del circuito como $3 \times 2,2 = 6,6$ A.

Debido a que el equipo de trabajo ya contaba con una fuente de 5V - 15A se decidió hacer entrega del prototipo con dicha fuente para no recaer en costos adicionales.

8.5.1. Esquema de conexión

Figura 74. Conexión con Arduino



Fuente: Los autores

8.6. FUNCIONAMIENTO DEL ROBOT

Uno de los elementos importantes dentro del diseño del proyecto es la interfaz de control o interfaz de usuario, es la que permite al usuario llevar a cabo los pasos para generar los movimientos que describen la geometría de la pieza diseñada.

El objetivo de la interfaz de control es integrar todas las funciones y subfunciones del robot en un entorno gráfico donde queden implícitos los resultados de los cálculos de diseño y la programación que permita al usuario realizar los pasos para lograr que el robot reproduzca las trayectorias correspondientes a una pieza generada en un software CAD.

Para lograr lo anterior es necesario definir los pasos a seguir y entender la selección de las herramientas de desarrollo en cada etapa, comenzando por el pre-procesamiento de datos hasta la generación de los movimientos del robot desde la interfaz de control, entendiendo el enfoque que se le da al robot hacia la impresión 3D y que será básicamente lo que diferenciará este proyecto de cualquier otro relacionado únicamente a los robots delta.

A continuación definimos una secuencia paso a paso de principio a fin de cada una de las etapas y sus requerimientos.

8.6.1. Creación de una pieza en un software CAD

Los software CAD son por excelencia una herramienta de diseño que ofrecen un conjunto de herramientas fáciles de usar para diseño mecánico en 3D, simulación y la creación de prototipos digitales que ayudan a diseñar, validar, obtener mejores resultados antes de fabricar y ya entrando en un ambiente productivo, ahorrar costos y optimizar los tiempos.

Para el desarrollo del robot delta enfocado a impresión 3D se ha tenido en cuenta que la mayoría de impresoras 3D que se han desarrollado utilizan archivos .stl generados inicialmente en un software CAD, desde las versiones más simples de la Rep-Rap, pasando por impresoras de gama baja y media hasta las versiones más avanzadas de Stratasys.

Como parte de la implementación de los conocimientos obtenidos en la institución se seleccionó el software Creo Parametric 2.0, como la mayoría de los software CAD encontrados en el mercado permite diseñar piezas en un ambiente 3D y exportarlas en una extensión .stl.

8.6.2. Exportar dicha pieza en una extensión .stl

Al hablar de extensiones .stl se hace referencia a la estereolitografía, un proceso muy común para obtener prototipos rápidos, basado en el principio de curar (endurecer) un fotopolímero líquido moldeado en una forma específica, un depósito que contiene un mecanismo para subir una plataforma, se llena con un polímero líquido fotocurable, el líquido es una mezcla de polímeros intermedios de acrílico.

Cuando la plataforma está en su posición más alta, la profundidad de la capa sobre ella es menor, un láser, en forma de rayo ultravioleta se enfoca en cierta superficie de seleccionada del fotopolímero y se mueve en las direcciones x e y, el haz cura esa parte del fotopolímero, a continuación la plataforma baja lo suficiente para curar otra capa hasta formar un sólido.

El proceso al que será enfocado el robot será la impresión por FDM, es decir, modelado por deposición de material fundido, el proceso consiste en una cabeza extrusora controlada por un robot, en este caso un robot delta, que permitirá movimientos en los tres ejes, x, y, z , se extruye un filamento de material termoplástico o cera por un pequeño orificio de un dado calentado, extruyendo a velocidad constante mientras la cabeza sigue una trayectoria predeterminada, terminada la primera capa se asciende comenzando un nuevo ciclo y dándole la forma a la pieza.

Los archivos de estereolitografía pueden provenir una amplia variedad de fuentes, su uso común se basa en que describen la geometría de la superficie de un objeto 3D sin ninguna información adicional como el color, el material o atributos muy complejos, que para el caso del robot ayuda mucho en la generación de la matriz de coordenadas y también para la matriz de ángulos.

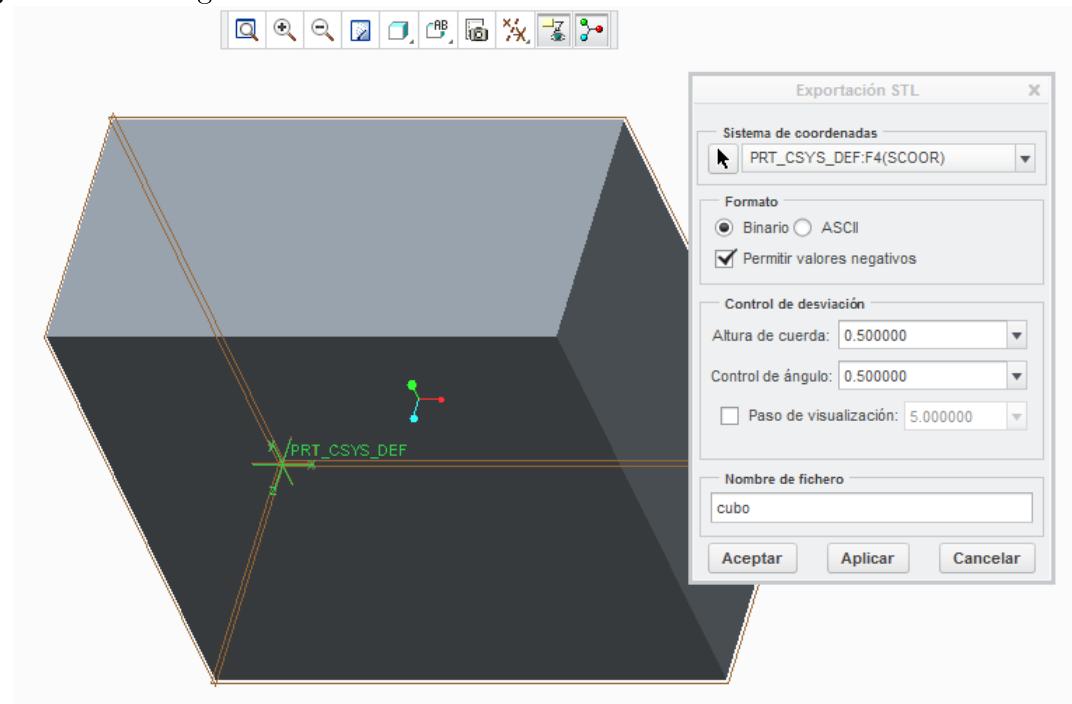
Para la exportación en Creo Parametric 2.0 es necesario comprender los parámetros a configurar para obtener una pieza que se acerque a la pieza original diseñada en el software, para ello es necesario:

Realizar el modelo de la pieza en milímetros

Tener en cuenta las dimensiones máximas

Luego de crear la pieza se configuran los siguientes parámetros de exportación

Figura 75. Configuración de Parámetros



Fuente: Los autores

Seleccionar el eje de coordenadas

Seleccionar el formato Permitir o no valores negativos

Definir el diámetro del filamento

Definir la precisión

Definir el paso

Dar un nombre al archivo

8.6.3. Abrir la pieza en extensión .stl con el software Silc3r

En el mercado se pueden encontrar varias opciones en el momento de seleccionar un software que permita la generación de códigos g teniendo como base un archivo .stl, el primero obstáculo es la poca información acerca del manejo del software y los costos de la licencia del mismo ya que este hace parte del paquete de venta de las impresoras 3D.

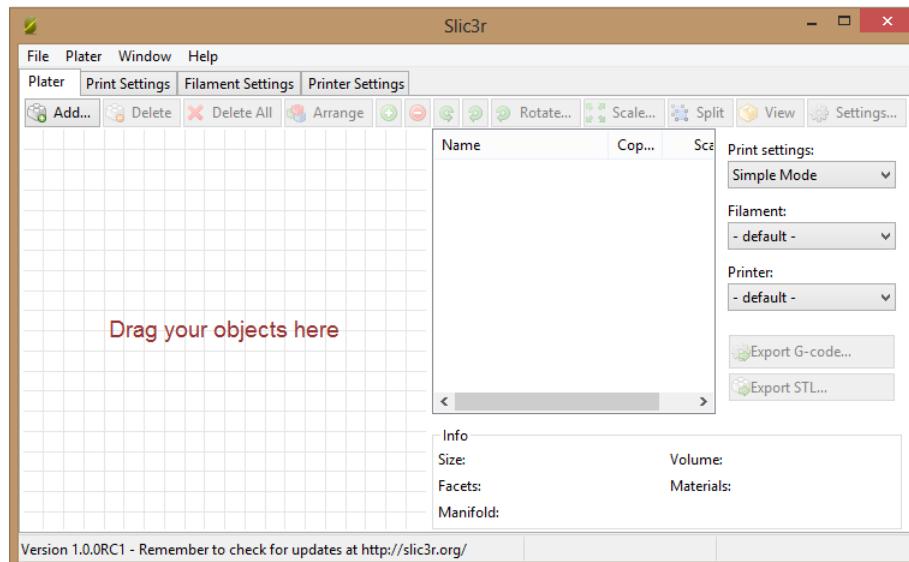
Una opción muy válida son los grupos de investigación y desarrollo de las universidades o de particulares interesados en construir su propia impresora 3D, ese es el caso de la

comunidad RepRap quienes se han encargado hacer varias publicaciones donde enseñan y recopilan información de cómo construir una impresora 3D.

El modelo desarrollado por esta comunidad es un robot cartesiano con una base caliente móvil, diferente del diseño del robot delta, pero lo interesante se encuentra en la información referente a software utilizado para procesar archivos en .stl a .gcode.

El software recomendado es el Slic3r una herramienta muy útil para el tema en cuestión.

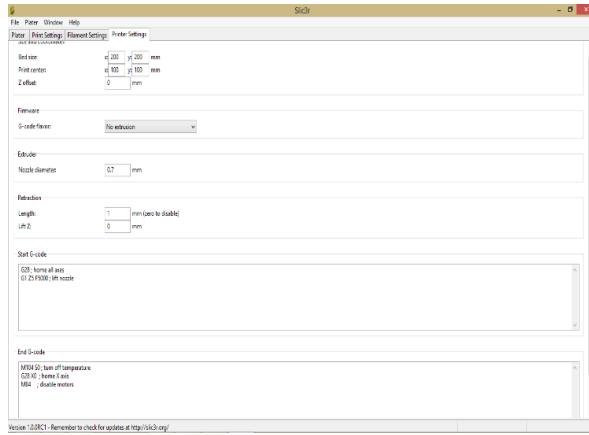
Figura 76. Slic3r



Fuente: Los autores

Slic3r corta el modelo en rebanadas horizontales (capas), genera las trayectorias para llenarlas y calcula la cantidad de material a extruir. Slic3r funciona y se incluye con los paquetes de software de host más importantes : MatterControl, Pronterface, Repetier-Host, ReplicatorG y ha sido apoyado/financiado por casi todas las principales empresas de impresión en 3D en el mundo. Para exportar un archivo .stl solo es necesario abrir el programa y seleccionar el archivo desde la herramienta de exportación.

Figura 77. Exportación Silc3r

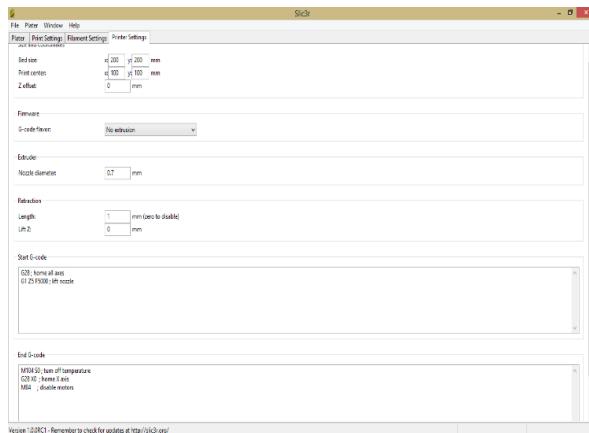


Fuente: Los autores

8.6.4. Generar un archivo con extensión .gcode

Luego de importar un archivo .stl previamente generado, la pieza queda cargada en el software, para generar el .gcode de la pieza es necesario modificar los siguientes parámetros: Definir el área de la base Definir el diámetro del filamento y de la boquilla. Definir las temperaturas de extrusión y de la cama, estos pasos se definen por defecto y no alteran el resultado final, en el procesamiento realizado en la interfaz de control se desprecian estos valores filtrando exclusivamente los datos correspondientes a las coordenadas de la pieza.

Figura 78. Definición Parámetros Silc3r



Fuente: Los autores

Definidos esos parámetros se exporta un nuevo archivo, este último en extensión .gcode.

8.6.5. Abrir la interfaz gráfica hecha en Matlab

Para la selección del software de diseño de la interfaz de control se tuvieron en cuenta las siguientes ventajas de desarrollo en Matlab: Creación de apps con interfaces gráficas de usuario en MATLAB Las GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo (con uso de ratón) de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación.

Las apps de MATLAB son programas autónomos de MATLAB con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o un cálculo. Por lo general, la GUI incluye controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes. También es posible crear apps personalizadas propias, incluidas las interfaces de usuario correspondientes, para que otras personas las utilicen. A fin de ejercer un mayor control sobre el diseño y el desarrollo, también se puede crear código de MATLAB que defina las propiedades y los comportamientos de todos los componentes.

MATLAB contiene funcionalidad integrada que le ayudará a crear la GUI para su app de forma programática. Cabe la posibilidad de agregar cuadros de diálogo, controles de interfaz de usuario (como botones y controles deslizantes) y contenedores (como paneles y grupos de botones).

Complementario a lo anteriormente mencionado Matlab permite controlar los periféricos del computador, un punto relevante para el diseño ya que se necesita que la interfaz se comunique con una plataforma exterior e independiente de control de los servomotores por medio de un periférico. Adicionalmente, Matlab cuenta con un Compiler Runtime (MCR) que permite ejecutar aplicaciones o componentes de MATLAB compilado sin instalar MATLAB, el Runtime Compiler de MATLAB (MCR) es un conjunto independiente de bibliotecas compartidas que permite la ejecución de aplicaciones o componentes de MATLAB compilados en equipos que no tienen instalado MATLAB.

Cuando se usan juntos, MATLAB, MATLAB Compiler y el MCR permiten crear y distribuir aplicaciones numéricas o componentes de software de forma rápida y segura. Resumiendo lo anterior, el compilador de Matlab permite generar interfaces de usuario, programadas y desarrolladas que pueden ser utilizadas en cualquier equipo aun cuando no se cuente con Matlab instalado, permitiendo así reducir los requerimientos de software para la interfaz.

8.6.6. Exportar el archivo en .gcode

Por medio de comandos básicos de lectura de ficheros de texto Matlab permite realizar la importación del archivo generado previamente en Slic3r con extensión .gcode, este último contiene un programa que incluye bloques de código, una lista secuencial de instrucciones para que la impresión sea automática y toda la información necesaria para realizar la impresión de la pieza, comienza con una programación preparatoria de la impresora, definición de la velocidad de impresión, la temperatura de extrusión y luego genera las coordenadas de la pieza en x, y z, capa a capa, con base en estas coordenadas se crea una matriz con los x,y z que componen la pieza, es decir, no será tenido en cuenta el código ajeno a la información de la pieza generada por Slic3r.

8.6.7. Generar la matriz de coordenadas

Una vez abierto el archivo con extensión .gcode se le aplican una serie de filtros de texto que permitan crear un nuevo archivo con extensión .txt esto con el objetivo de obtener solamente las coordenadas de la pieza, generando la matriz de coordenadas x,y z que será evaluada por la cinemática inversa del robot.

Para filtrar esta información es necesario entender primero la estructura de un programa en código g generado en Slic3r.

A continuación se presenta un fragmento del programa y la descripción de la estructura:

Se debe tener en cuenta que en la exportación realizada para este caso en la opción Firmware se seleccionó No extrusion.

; generated by Slic3r 1.0.0RC1 on 2013-12-08 at 06:37:04 Detalle de la fecha de exportación del archivo

```
; layer_height = 0.4
; perimeters = 3
; top_solid_layers = 3
; bottom_solid_layers = 3
; fill_density = 0.4
; perimeter_speed = 30
; infill_speed = 60
```

```
; travel_speed = 130  
; nozzle_diameter = 0.5  
; filament_diameter = 3  
; extrusion_multiplier = 1  
; perimeters_extrusion_width = 0.50mm  
; infill_extrusion_width = 0.53mm  
; solid_infill_extrusion_width = 0.53mm  
; top_infill_extrusion_width = 0.53mm  
; first_layer_extrusion_width = 1.00mm
```

En esta primera parte del código se definen los valores ya configurados en la interfaz pero que serán programados en la máquina, parámetros de impresión, altura del filamento, densidad del filamento, escala, velocidad de extrusión de capas interiores, velocidad de extrusión de capas exteriores (acabado de la pieza), entre otras.

G21 ; set units to millimeters %Sección de las unidades a trabajar como milímetros

M107; %Inicio del programa

M104 S205 ; set temperature %Definir temperatura del extrusor

G28 ; home all axes %Llevar la impresora a un punto de referencia en todas las coordenadas

G1 Z5 F5000 ; lift nozzle %Define la elevación de la boquilla

M109 S205 ; wait for temperature to be reached %Espera hasta que se alcanza la temperatura de objetivo

G90 ; use absolute coordinates %Utilizar un sistema de coordenadas absoluto

G1 F1800.000

G1 Z0.500 F7800.000

G1 X85.130 Y85.130 F7800.000

G1 X86.170 Y84.270 F540.000

G1 X87.360 Y83.630

G1 X88.660 Y83.240

G1 X90.000 Y83.110

G1 X109.990 Y83.110

G1 X111.330 Y83.240

G1 X112.630 Y83.630

G1 X113.820 Y84.270

G1 X114.860 Y85.130

G1 X115.720 Y86.170

Esta parte del código es la más importante para el objetivo que se busca, la parte central de la estructura del código está compuesto por el recorrido coordenada a coordenada de la pieza de acuerdo a los parámetros configurados, estas coordenadas serán las variables de entrada para la función cinemática del GUIDE, esta última tiene como salidas los ángulos para los tres motores que permitirán llegar a la coordenada evaluada.

Todas las líneas que contienen información de las coordenadas de la pieza están precedidas por “G1”, así que el primer filtro de texto del GUIDE será esa condición. En la estructura de las líneas de coordenadas se observa que se trabaja en los planos x e y, luego de terminada dicha capa se aumentan el valor en z para realizar capa a capa desde la base hasta terminar la pieza.

También se puede observar que algunas líneas de código que contienen una coordenada en z, también tienen un código adicional que comienza con la letra F, este texto adicional también debe ser quitado de dichas líneas para realizar el filtrado exclusivo de las coordenadas de la piezas. La estructura del programa hecho en Matlab e implementado en la GUIDE es el siguiente:

A. Abrir el archivo .gcode, para esto se utiliza el botón “Abrir Archivo”, que permite navegar dentro de las carpetas del equipo en busca del archivo en .gcode, luego de abrirlo aparecerán en las caja de texto la información respectiva de la ruta y el nombre del archivo.

Figura 79. Abrir Archivo

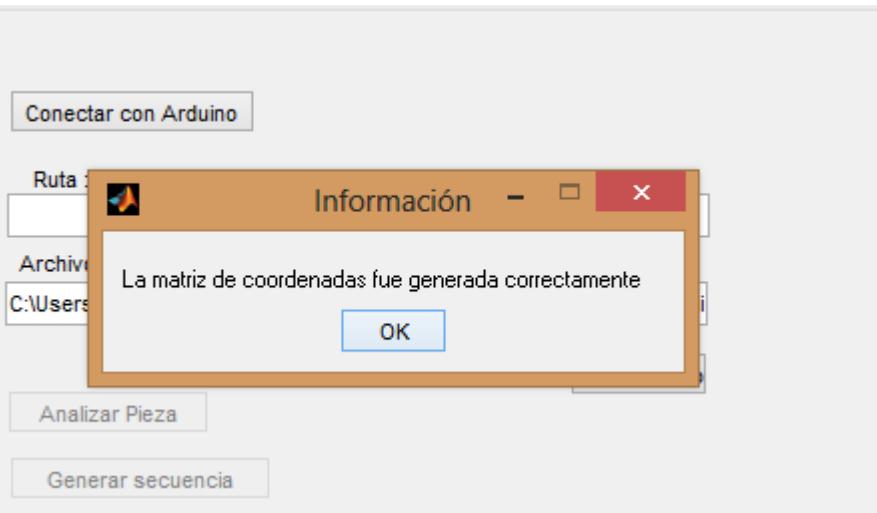


Fuente: Los autores

- B. Realizan iteraciones para recorrer línea por línea el archivo
- C. Cada línea se recorre como un vector, posición a posición.
- D. Buscar en las líneas del archivo que tienen G1 precediendo el texto, las que cumplen con dicha condición, son leídas carácter a carácter en busca de coordenadas en x e y, ó en z, guardando las posiciones dentro del arreglo para luego armar el número de la coordenada.
- E. Hallar las posiciones que existen entre la coordenada en x e y, realizar esto tiene como objetivo no llenar una coordenada con datos erróneos como un espacio o parte de la coordenada en otro eje.
- F. Luego de haber realizado lo anterior el paso siguiente es empezar a almacenar en un nuevo archivo de texto las coordenadas correspondientes a cada eje, primero x, espacio, la coordenada en y, espacio y por último la coordenada en z más un salto de línea para continuar con las siguientes coordenadas.
- G. Para realizar la impresión de la coordenada en el archivo de texto se realiza una iteración que va guardando carácter a carácter los que se encuentran dentro del tamaño de la coordenada respectiva, incluyendo la coma decimal.
- H. En el caso de la coordenada en z, que se mantiene implícita con el mismo valor se maneja una variable adicional llamada “banderaz” que guardará el valor de ese eje hasta que se encuentre una línea modificándolo y así poder siempre almacenar línea a línea los valores en los tres ejes.

I. Terminado el recorrido por el archivo el último paso es cerrarlo, además aparecerá la ventana emergente mostrada a continuación.

Figura 80. Ventana Ok



Fuente: Los autores

M107 Fin del programa M104 S0; turn off temperatura Apaga extrusor G28 X0; home X axis Mover a una referencia en X M84 ; disable motors Deshabilitar los motores

8.6.8. Generar matriz de ángulos de los motores

Una vez generada la matriz de coordenadas de la pieza lo siguiente dentro del programa es tomar ese archivo con dicha información y utilizarlo como entrada para una función creada en Matlab llamada “Cinemática Inversa”, esta se encargará de generar una nueva matriz con los ángulos de movimiento de cada uno de los motores.

8.6.9. Conectar con Arduino

El robot delta como se vio previamente en la explicación del diseño mecánico, está compuesto por tres servomotores análogos, estos son quienes permitirán el movimiento de los brazos obligando a la estructura a llegar a las posiciones, deseadas.

El control de los servomotores se debe realizar desde la interfaz gráfica pero no es suficiente sin una plataforma electrónica que integre la etapa de control con la potencia, es necesario que la información de la matriz de ángulos sea enviada a los motores y que

estos realicen los movimientos respectivos, es allí donde es necesario evaluar las opciones y determinar la plataforma a seleccionar teniendo los siguientes requerimientos:

1. Comunicación con Matlab por medio de un puerto periférico
2. Procesamiento de datos Generar PWM para control de servomotores
3. Lectura real de la posición de los servomotores
4. Conexiones de entrada y salida de fácil implementación.

Definidos estos requerimientos se procedió con la selección de la plataforma Arduino.

8.6.10. Configuración de Arduino

Dentro del GUI creado en Matlab se encuentra la programación previa que permitirá la comunicación con el Arduino, desde allí se configurarán los puertos de PWM y los comandos necesarios para el movimiento de los servomotores y la lectura de la posición en ángulos de los mismos.

8.6.11. Secuencia de los movimientos del motor

Generada la matriz de ángulos se programa una secuencia donde se sincronizan los motores con Matlab para realizar los movimientos que describen la geometría de la pieza generada en el software CAD. Interfaz de control y GUI de Matlab Anteriormente se trataron los pasos básicos que componen el proceso de creación de un archivo CAD y su procesamiento hasta llegar a las secuencias de movimientos para los motores, a continuación se revisarán las subfunciones del programa creado en Matlab.

El programa de Matlab está compuesto por una serie de botones, cajas de texto, texto estáticos y variables que permitirán al operador seguir una secuencia de trabajo, la interfaz está diseñada para guiar y evitar problemas de mal uso, esto es logrado por medio de la modificación de los atributos de habilitación y visibilidad de los elementos de la interfaz, con ventanas emergentes que muestran mensajes de avances en los procesos.

Estos elementos gráficos son programados en un archivo .m de Matlab, en este se realizan llamados a funciones, subfunciones y las restricciones necesarias para cada una de las etapas, integra las restricciones físicas del robot y las de software evitando realizar acciones que puedan afectar el funcionamiento del robot o de la interfaz.

9. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo se lograron establecer las características de cada uno de los componentes del Robot Delta a fin de cumplir con los objetivos fijados inicialmente de acuerdo a la búsqueda de su aplicación en impresión 3D.

Se realizó la construcción de un primer prototipo de baja resolución y el desarrollo de la interfaz de usuario, con el interés de facilitar una herramienta de práctica e investigación al laboratorio de Robótica de la ETITC.

El robot paralelo Delta con actuadores rotacionales tiene grandes prestaciones, pero para la fabricación de impresoras 3D con un amplio volumen de trabajo, es viable contemplar la posibilidad de usar actuadores translacionales en la configuración del robot paralelo tipo Delta, con lo cual el volumen de trabajo será mayor, igualmente hay que tener en cuenta que la complejidad de diseño se ve afectada siendo más tedioso el modelamiento matemático.

Teniendo en cuenta el sistema de control de los servomotores Dynamixell y el de los servomotores seleccionados para el proyecto se puede encontrar una diferencia considerable en el control, en primer lugar los motores seleccionados para el proyecto permiten un control rápido a causa de los avances alcanzados con la tarjeta Arduino, esta tarjeta es un desarrollo de hardware libre que permite desarrollar aplicaciones a medida de una manera rápida, es fácil encontrar librerías y funciones para múltiples aplicaciones en software de control como Matlab, facilitando la programación de elementos que permitan especializarse en temas específicos del proyecto.

Los servomotores Dynamixell pueden ser controlados desde Arduino pero requieren de una programación mucho más compleja, empezando porque estos motores tienen más parámetros de configuración y de monitoreo, la integración del control con Matlab también es más complejo, pero Matlab como herramienta de desarrollo ha ido integrando sus diferentes servicios a la tarjeta Arduino y los servomotores Dynamixell lo que permitiría en un corto plazo diseñar la versión final del robot y no del prototipo como es el objetivo de este trabajo. Hay que tener en cuenta que este cambio también significaría una inversión económica mayor en servomotores, variando desde tres veces lo invertido en el proyecto actual.

Buscar un buen software para el diseño de la interfaz de control no es fácil teniendo en cuenta que al ser una interfaz de usuario el objetivo de la misma es facilitar la comunicación entre la máquina y el diseñador, es decir, debe permitir una correspondencia entre el diseño y el resultado, la ejecución de tareas indispensables para el funcionamiento de la máquina a nivel de control y procesamiento de órdenes, y además una ejecución rápida y sencilla en cualquier ordenador, es importante que la interfaz facilite cualquier tipo de trabajo en diferentes niveles.

En ese orden de ideas el GUI de Matlab como herramienta de diseño de la interfaz gráfica permite crear el entorno gráfico de manera rápida y programar el control de objetos para permitir guiar al usuario en la formulación de órdenes, al mismo tiempo que ejecuta las tareas necesarias para ajustarse al diseño, es una herramienta que permite desarrollar aplicaciones para generar funciones y subfunciones complementarias con la interfaz de desarrollo, permite trabajar y exportar ficheros de datos de diferentes extensiones, procesarlos para convertirlos en sentencias de control y conectar dispositivos que permiten controlar actuadores rápidamente.

El Compiler Runtime (MCR) Matlab también permite generar archivos ejecutables, esto permite que el usuario no esté ligado al licenciamiento de cierto software, es cierto que el ordenador debe cumplir con unos requisitos mínimos en su sistema operativo para lograr trabajar el programa, pero que no son limitaciones si se tiene en cuenta que se trabajan en ordenadores enfocados hacia el diseño.

El software Slic3r 1.0.0RC1 al igual que la tarjeta Arduino han tenido bastantes aportes por parte de profesionales de diferentes áreas de investigación lo que permite un acceso rápido a diferentes características del mismo software de desarrollo, facilitando desarrollar y especializarse en temas específicos del trabajo, es decir, para una futura construcción del sistema de extrusión de material, Slic3r 1.0.0RC1 permitirá una integración rápida con el código de Matlab, permitiendo además al diseñador ajustar características más específicas de impresión 3D y así mismo ajustar el resultado al diseño.

10. DIVULGACIÓN

El presente trabajo de grado será entregado de forma impresa para su consulta, a la biblioteca de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central.

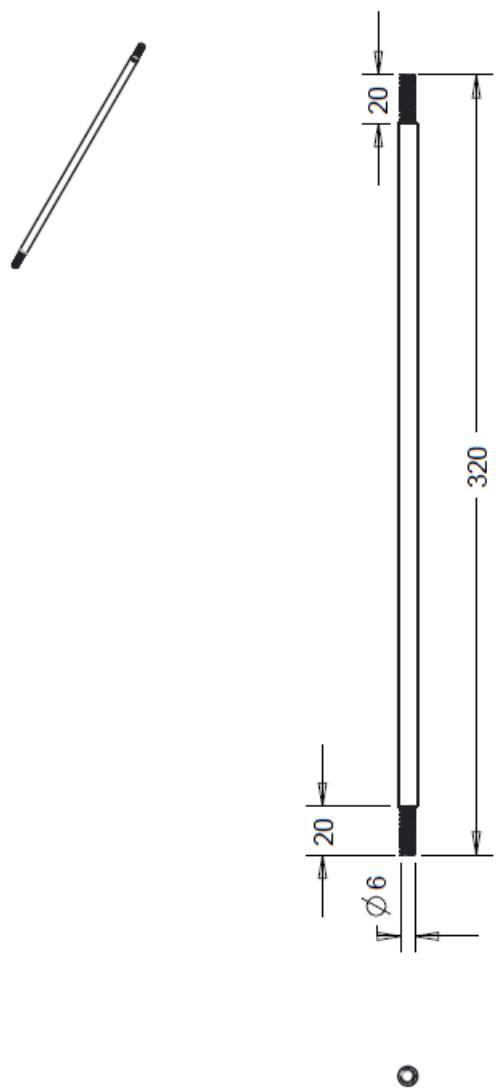
De la misma manera, junto al prototipo se entregará copia en Disco Compacto con el software necesario para su uso, al laboratorio de Robótica de la misma institución.

Bibliografía

- BARRIENTOS, A. 2007. Fundamentos de robótica. McGraw-Hill, Madrid, España.
- CLAVEL, R. 1989. Une nouvelle structure de manipulateur parallèle pour la robotique légère. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 23, Vol. 6, pp. 501-519.
- FU, K., GONZALEZ, R., LEE, C. 1988. Robótica: control, detección, visión e inteligencia. McGraw-Hill, Madrid, España.
- MARTINEZ, E; PEÑA C. Diseño óptimo de un robot paralelo con configuración delta para aplicaciones educativas. En: Educación en Ingeniería. Diciembre, 2010, 10 ed. ISSN 1900-8260.
- CASTILLO, C.E; VÁZQUEZ, R.A.O; GONZÁLEZ, H. A. Desarrollo del robot paralelo Parallix LKF-2040. En: Ingenio Magno. Octubre, 2011, 3 Vol. ISSN 2145-9282.
- BALMACEDA, S. A; CASTAÑEDA C.E. Metodología de rediseño de un robot paralelo tipo Delta de 3-GDL en función de un espacio de trabajo prescrito. En: Nexo. Junio, 2013, 23 Vol. ISSN-L 1818-6742.
- VÁZQUEZ, J.L.G; CISNEROS, L.R; MENDOZA, V; PALOMARES,R.A. Análisis cinemático y simulación de un robot paralelo de estructura 6-RSS. En: Científica. Junio 2007, 11 Vol. ISSN 1665-0654.
- GARCÍA J. A; RAMÍREZ D. A; GARCÍA U; CORTÉS J. E; CIFUENTES A. F; RODRÍGUEZ, S. Diseño hacia ensamble y manufactura de un prototipo robótico experimental tipo Delta. En: Intekhnia. Junio 2011, 6 Vol. ISSN: 1900-7612 .

ANEXOS

Figura 81. Plano Antebrazo

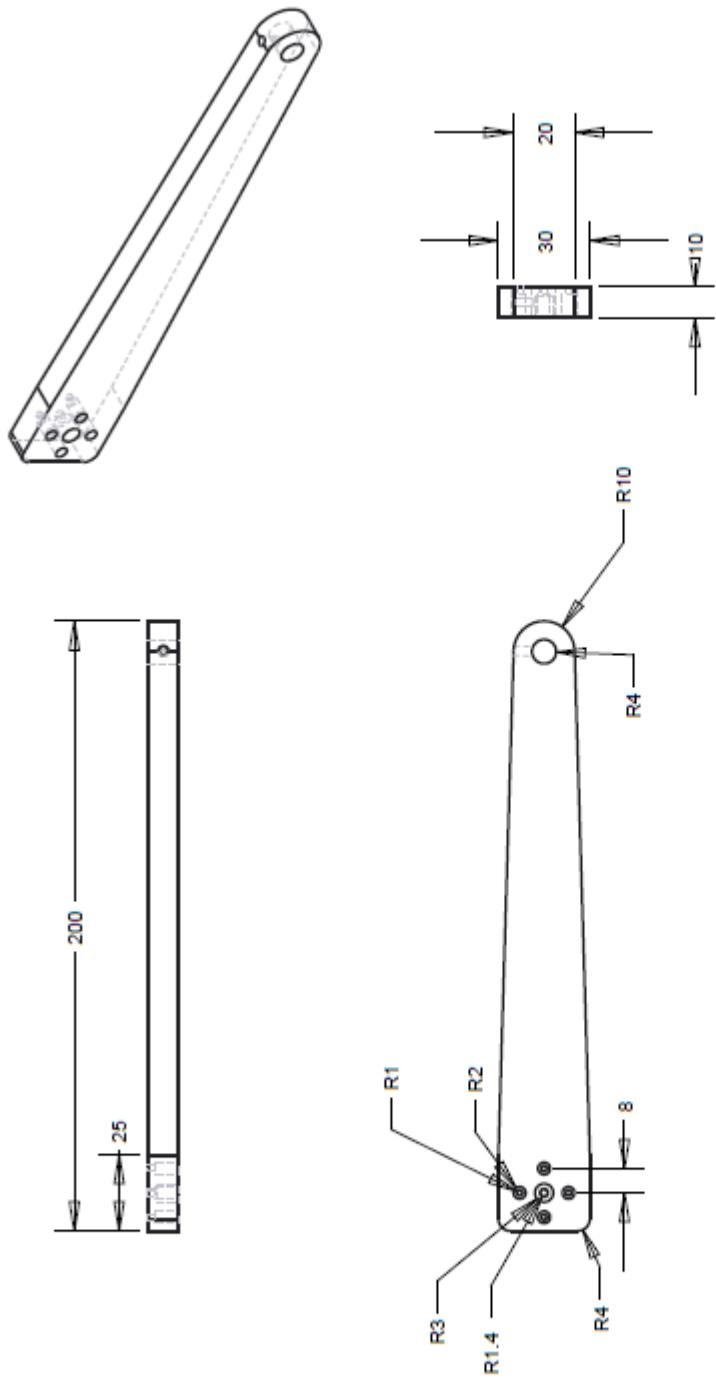


INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D

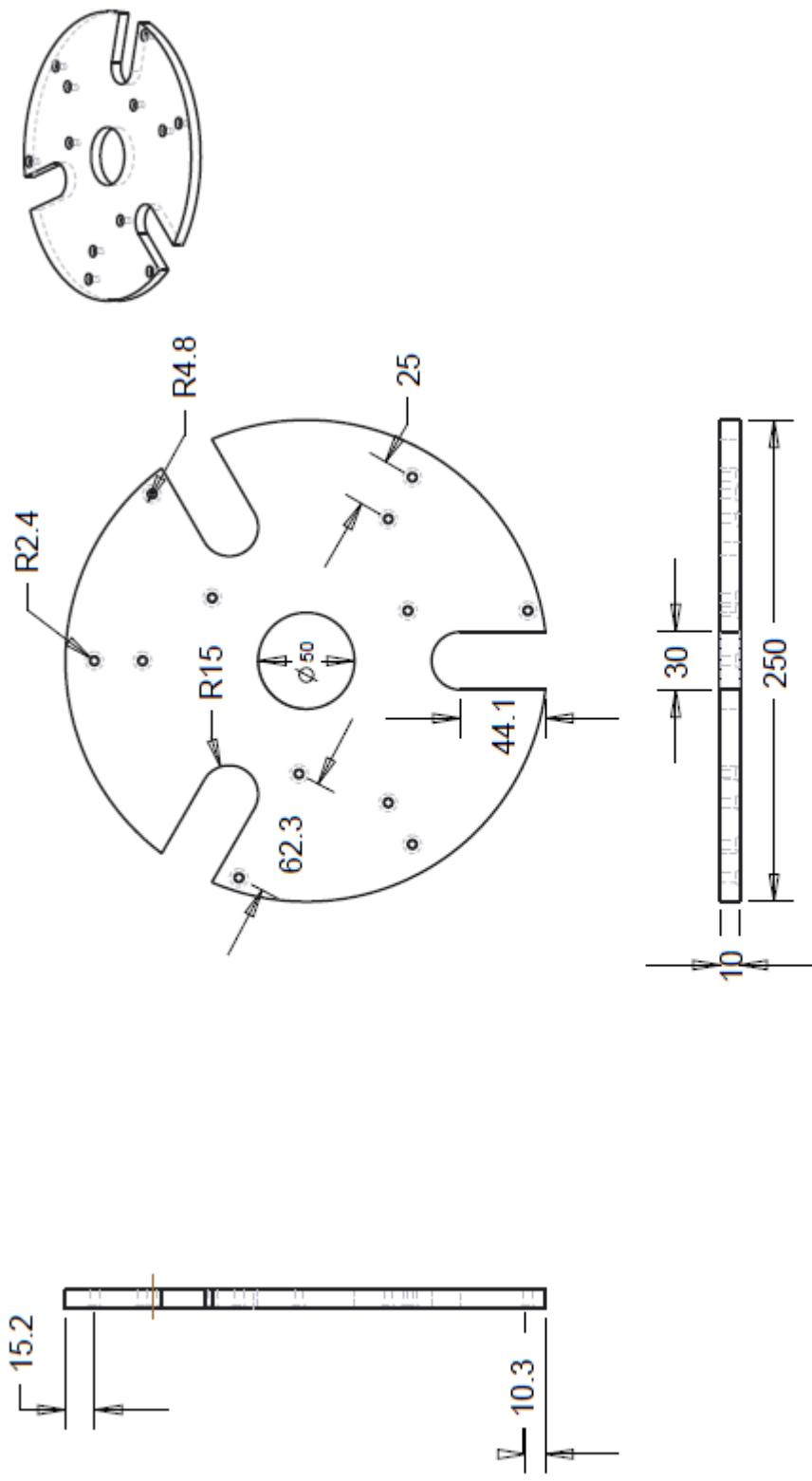
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS	DESCRIPCIÓN
ANTEBRAZO		1:2	MILÍMETROS	PIEZA

Figura 82. Plano Brazo



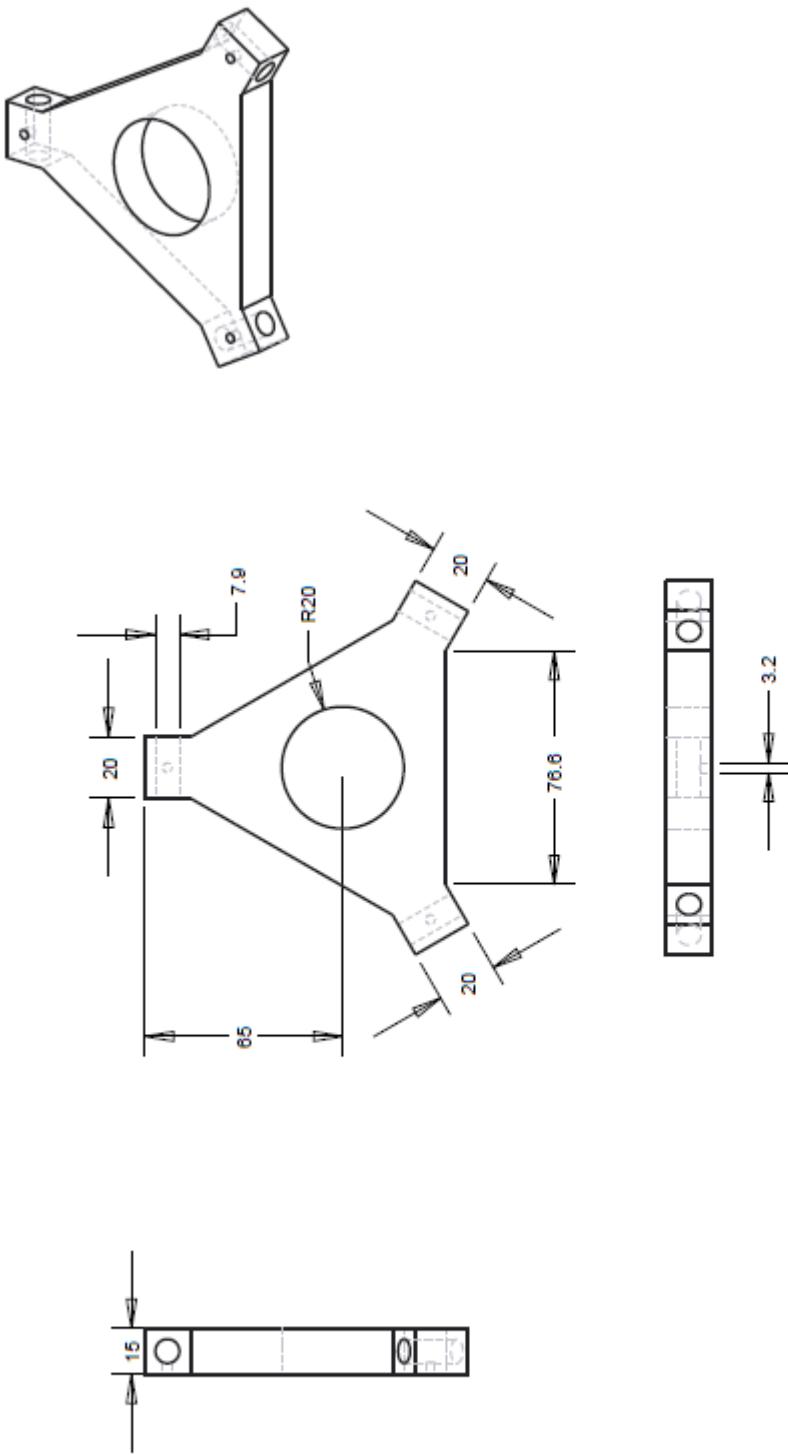
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
BRAZO		1-2	MILÍMETROS
			PIEZA

Figura 83. Plano Base Fija



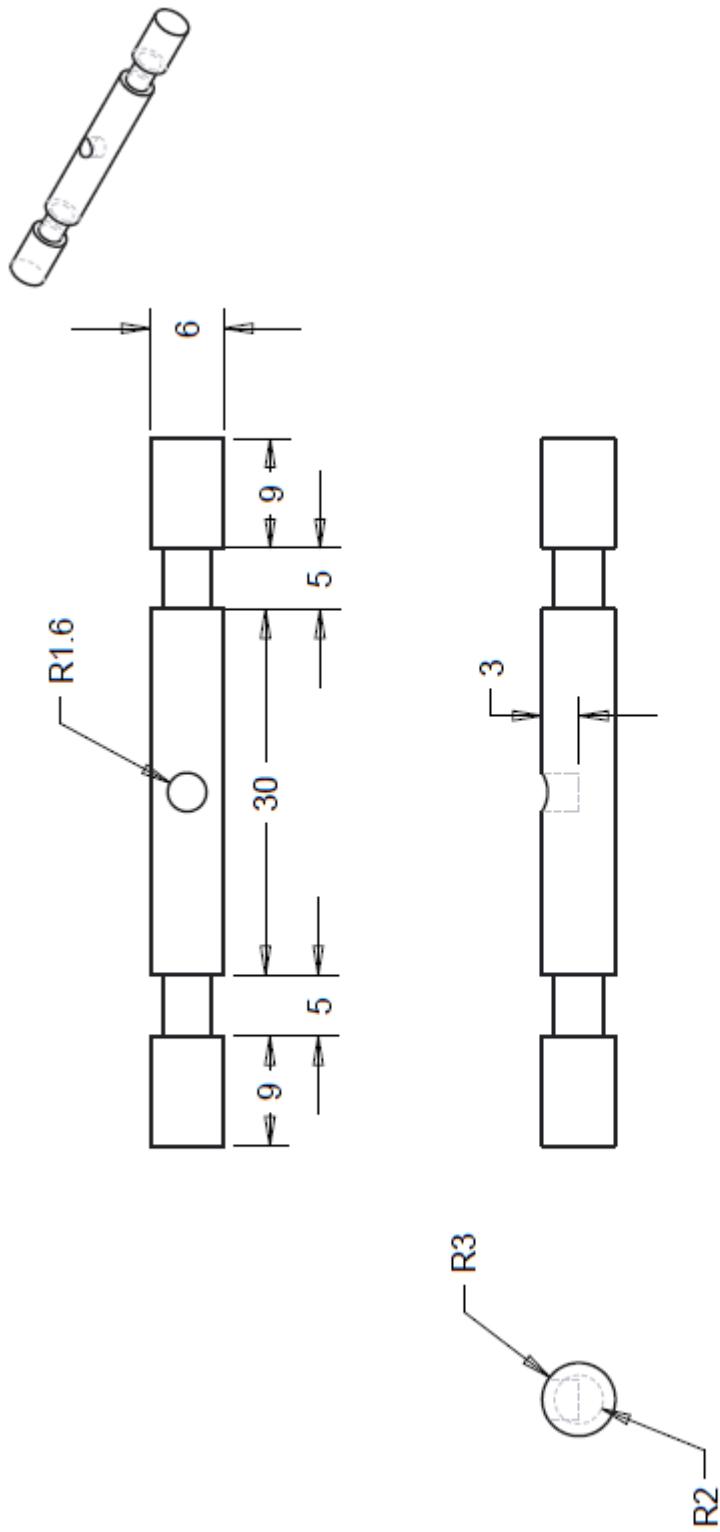
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
BASE FIJA		1-3	MILÍMETROS

Figura 84. Plano Base Móvil



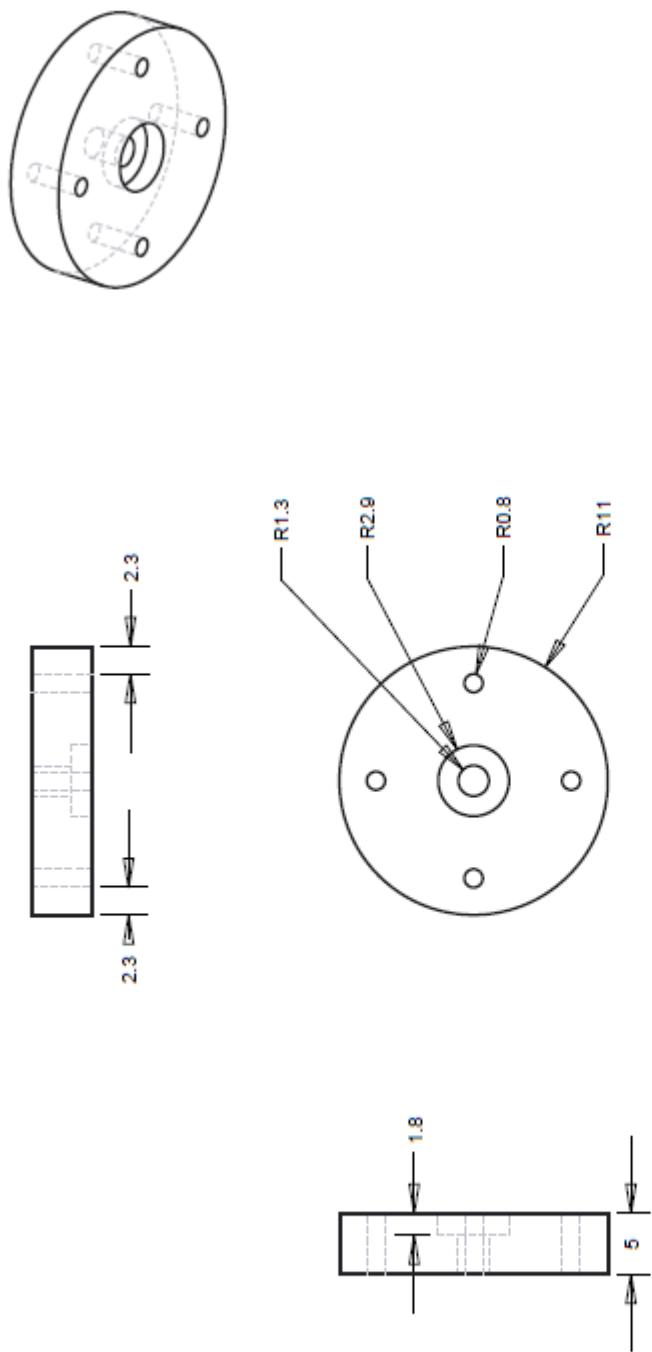
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
BASE MÓVIL		1-2	MILÍMETROS
			PIEZA

Figura 85. Plano Eje Antebrazo



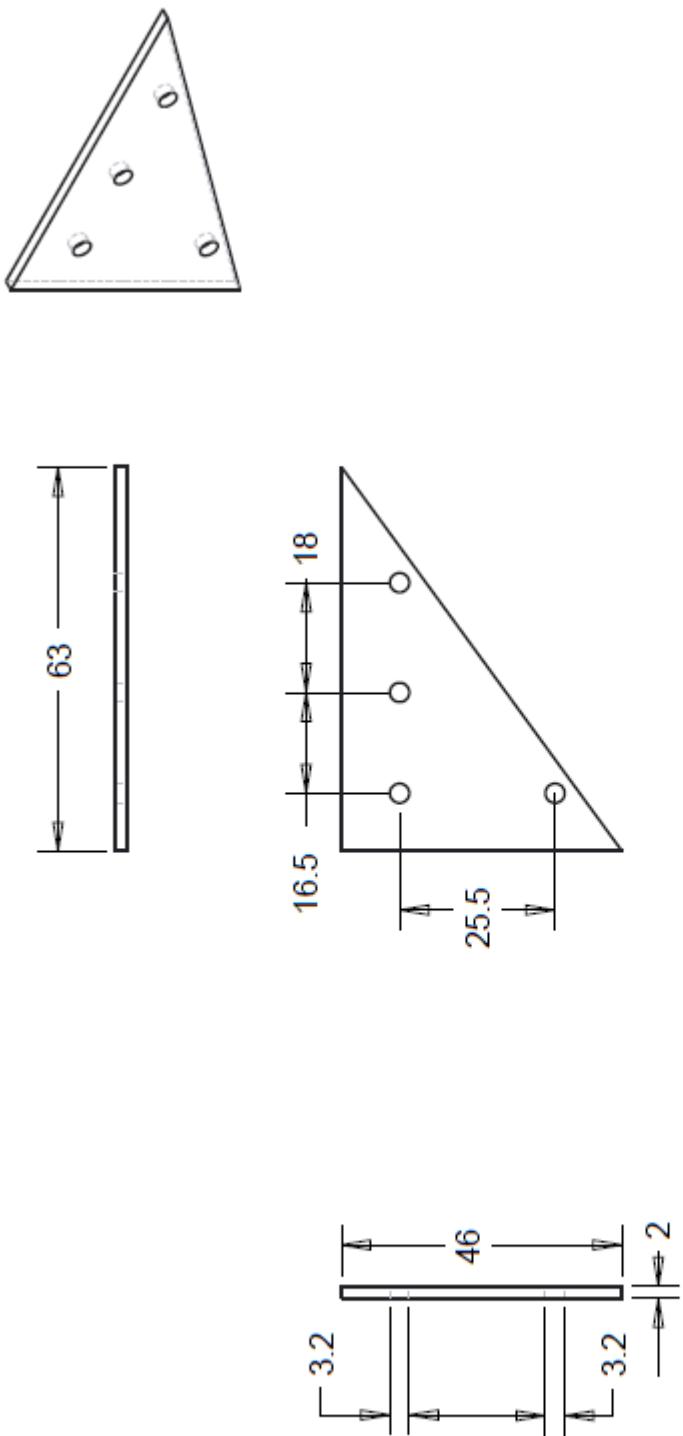
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	DESCRIPCIÓN
EJE		2-1	MILÍMETROS

Figura 86. Plano Eje Servomotor



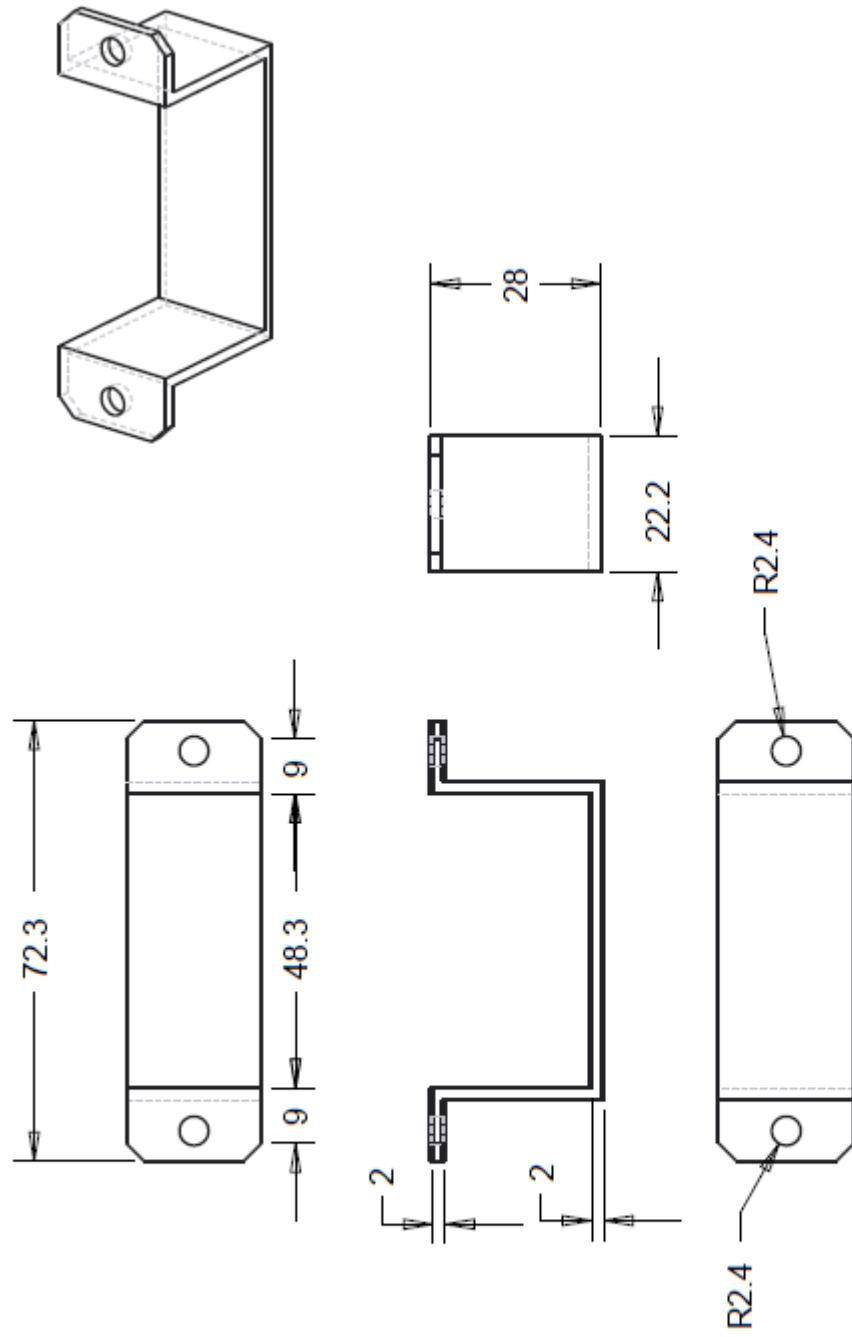
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
EJE SERVOMOTOR		2-1	MILÍMETROS

Figura 87. Plano Pie de Amigo



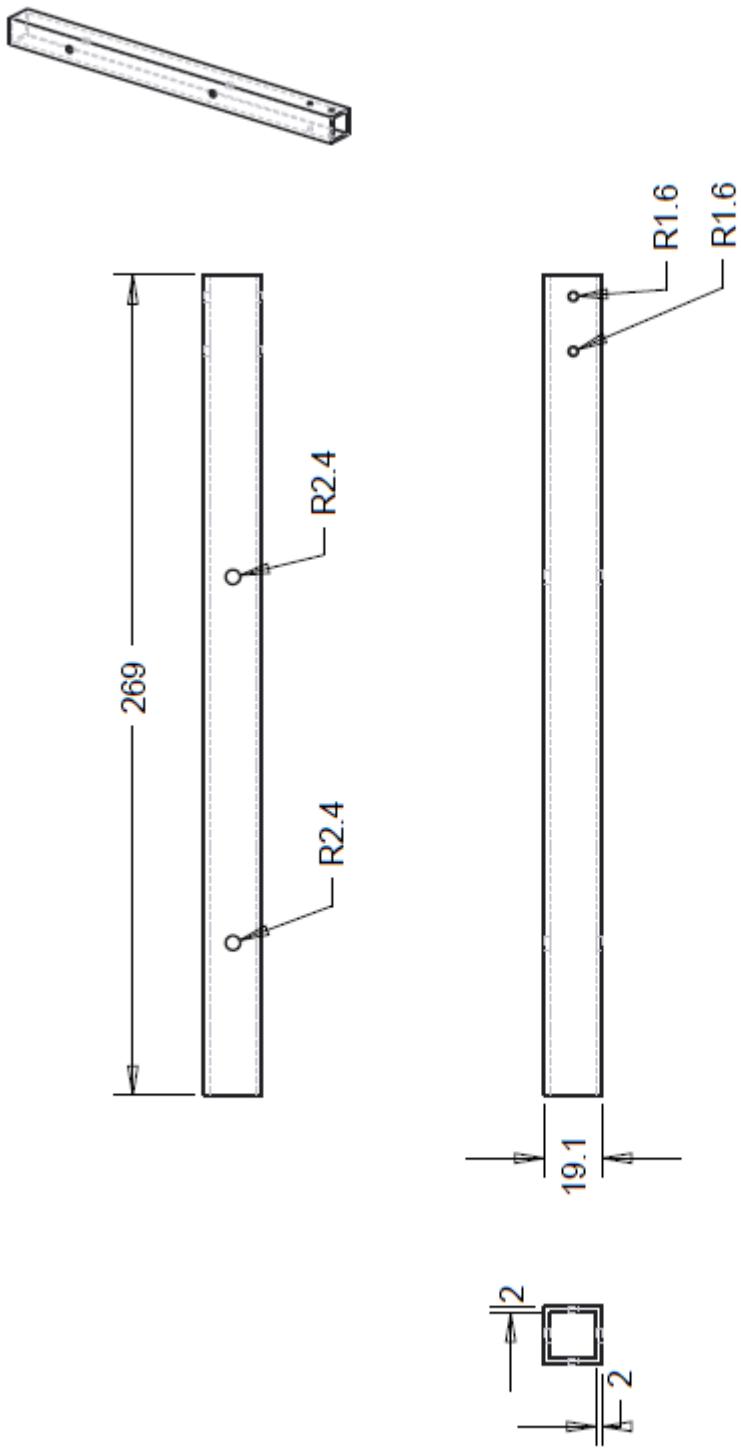
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
PIE DE AMIGO		1-1	MILÍMETROS

Figura 88. Plano Soporte Motor



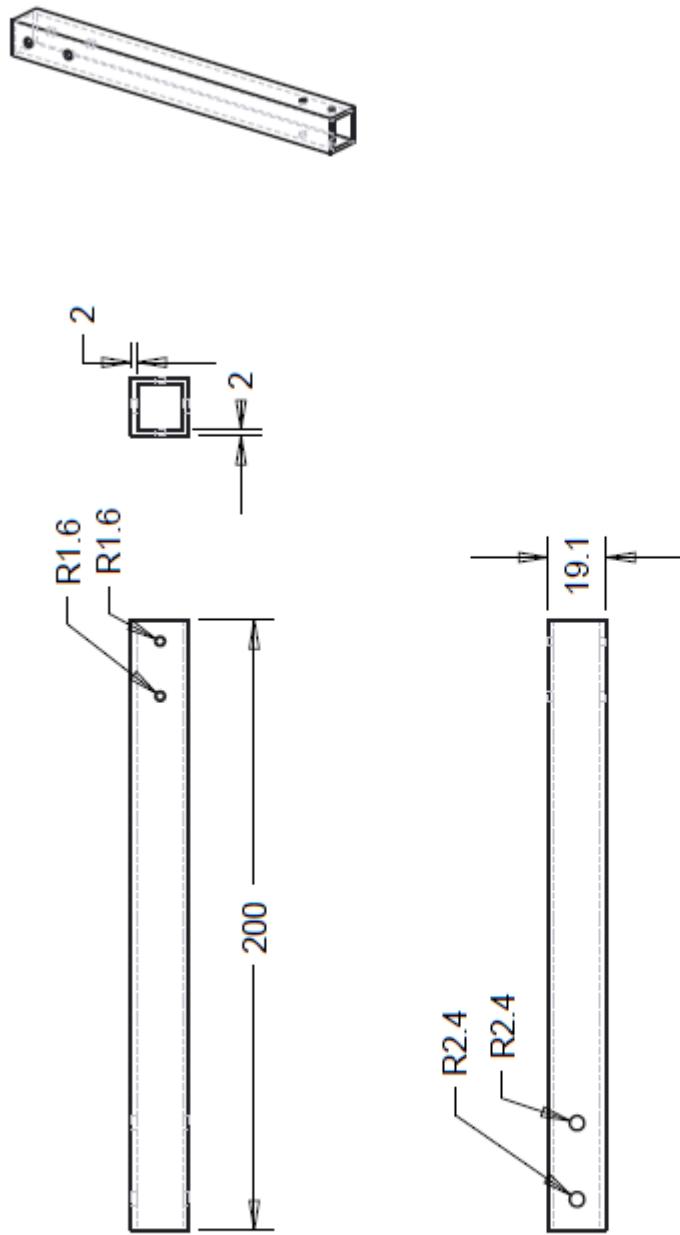
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
SOPORTE MOTOR		1-1	MILÍMETROS
			PIEZA

Figura 89. Plano Viga Base



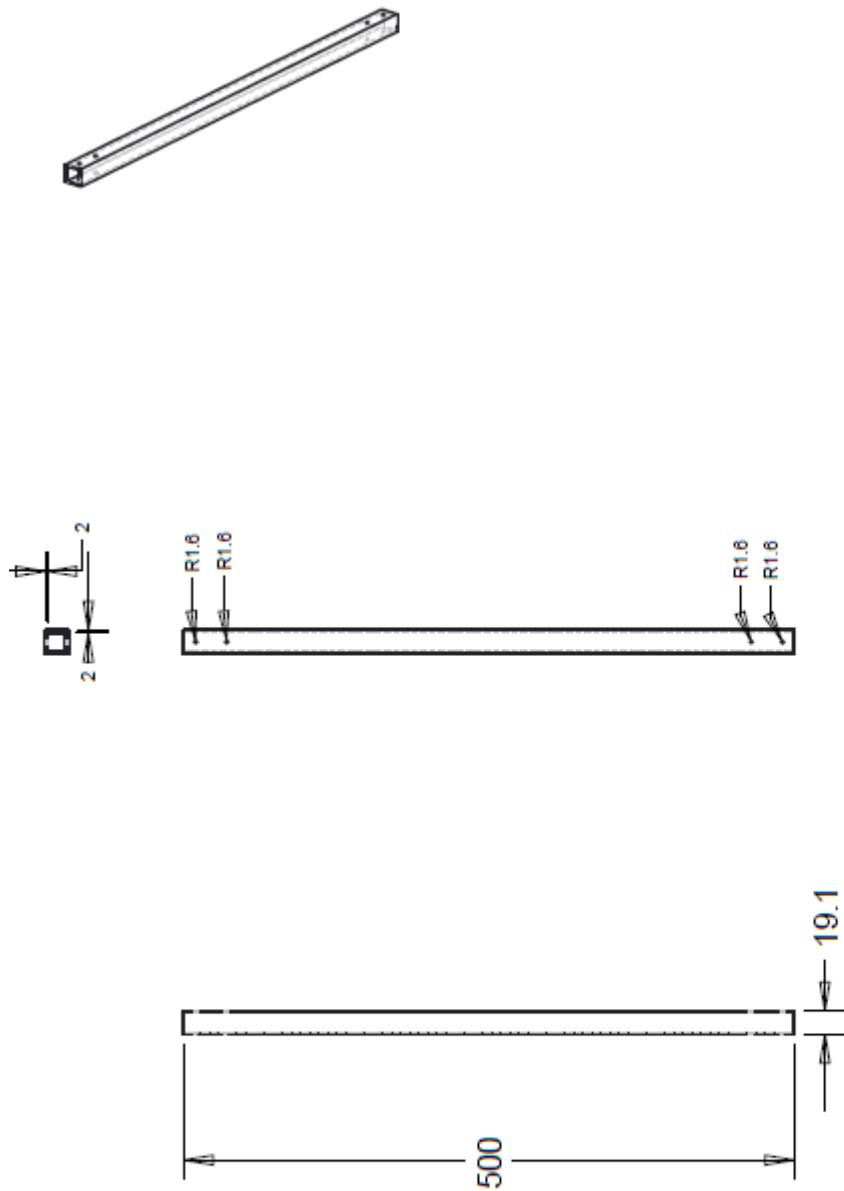
INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
VIGA BASE		1-2	MILÍMETROS

Figura 90. Plano Viga Horizontal



INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
VIGA HORIZONTAL		1-2	MILÍMETROS
			PIEZA

Figura 91. Plano Viga Vertical



INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL ESCUELA TECNOLÓGICA			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA ENFOCADO A LA IMPRESIÓN 3D			
NOMBRE	REVISADO	ESCALA	MEDIDAS
VIGA VERTICAL		1-5	MILÍMETROS PIEZA

Figura 92. Diagrama de flujo (1)

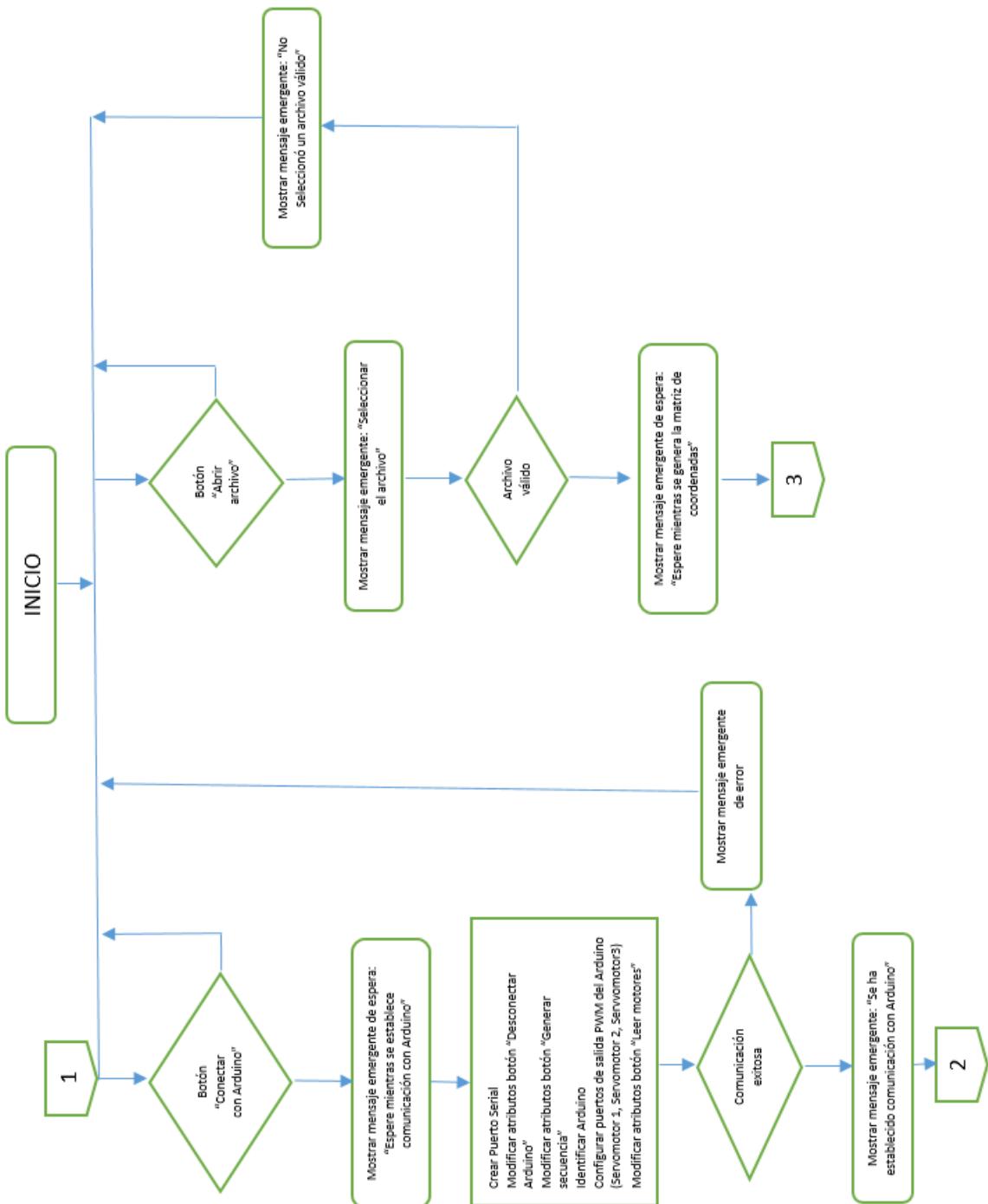


Figura 93. Diagrama de flujo (2)

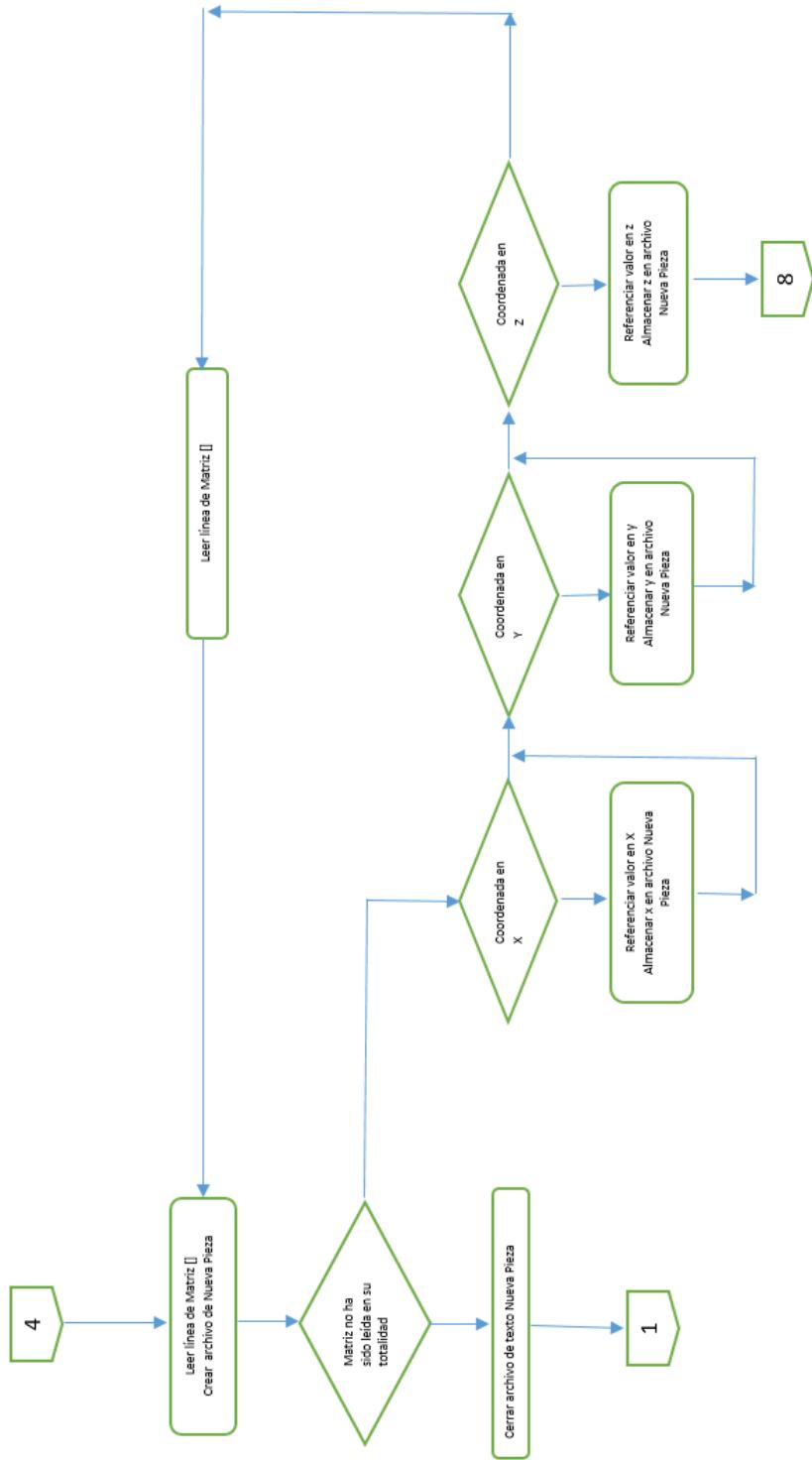


Figura 94. Diagrama de flujo (3)

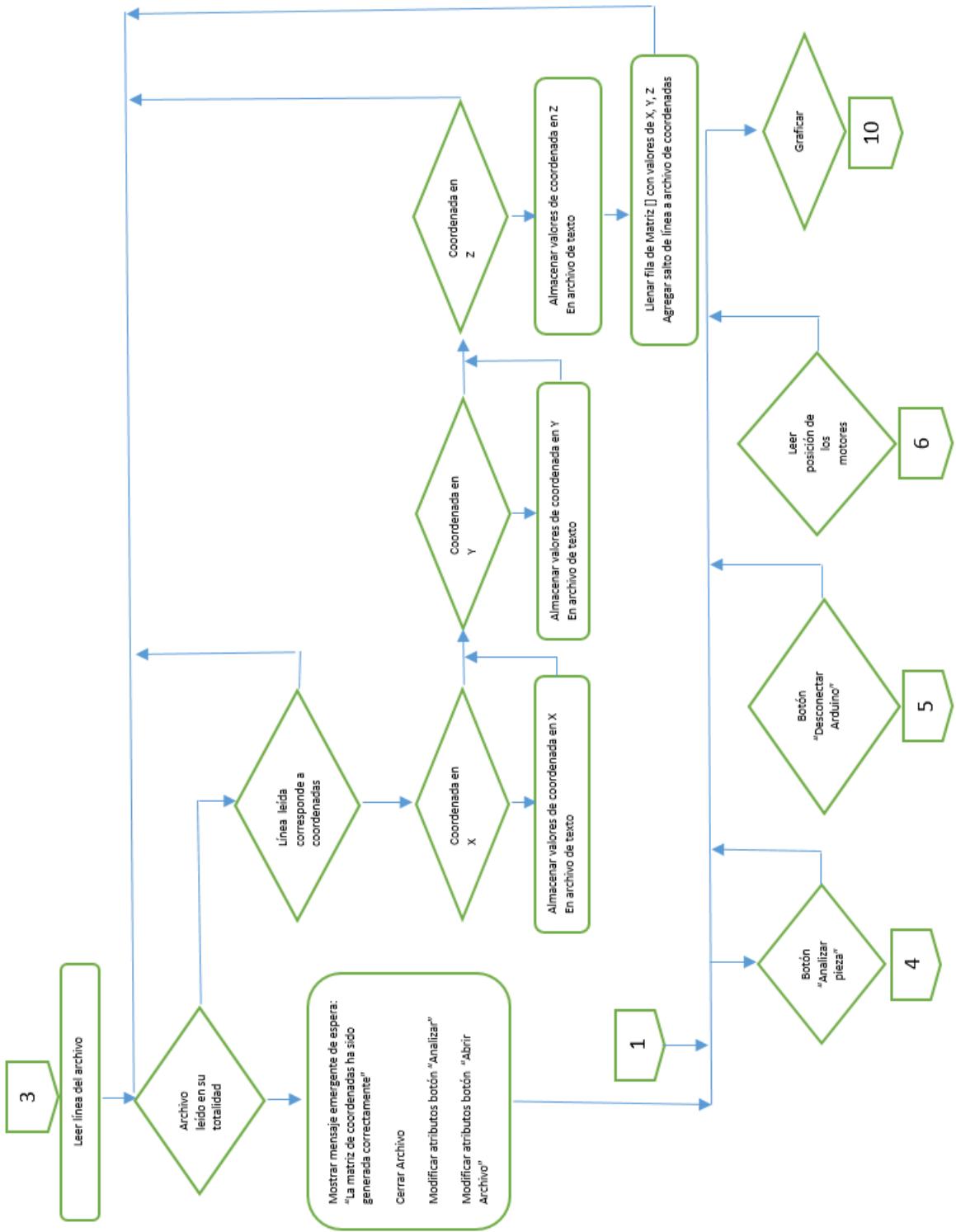


Figura 95. Diagrama de flujo (4)

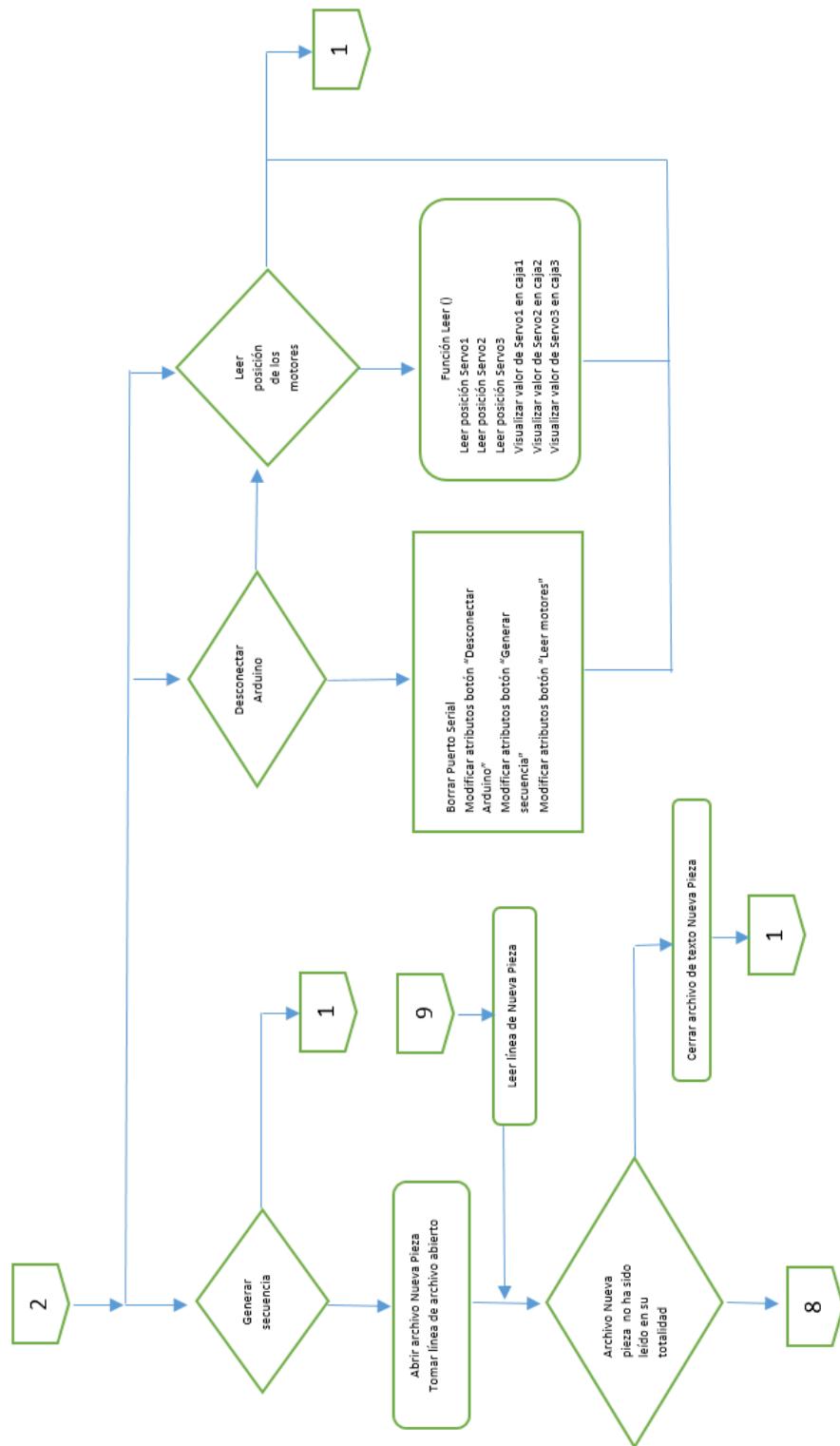


Figura 96. Diagrama de flujo (5)

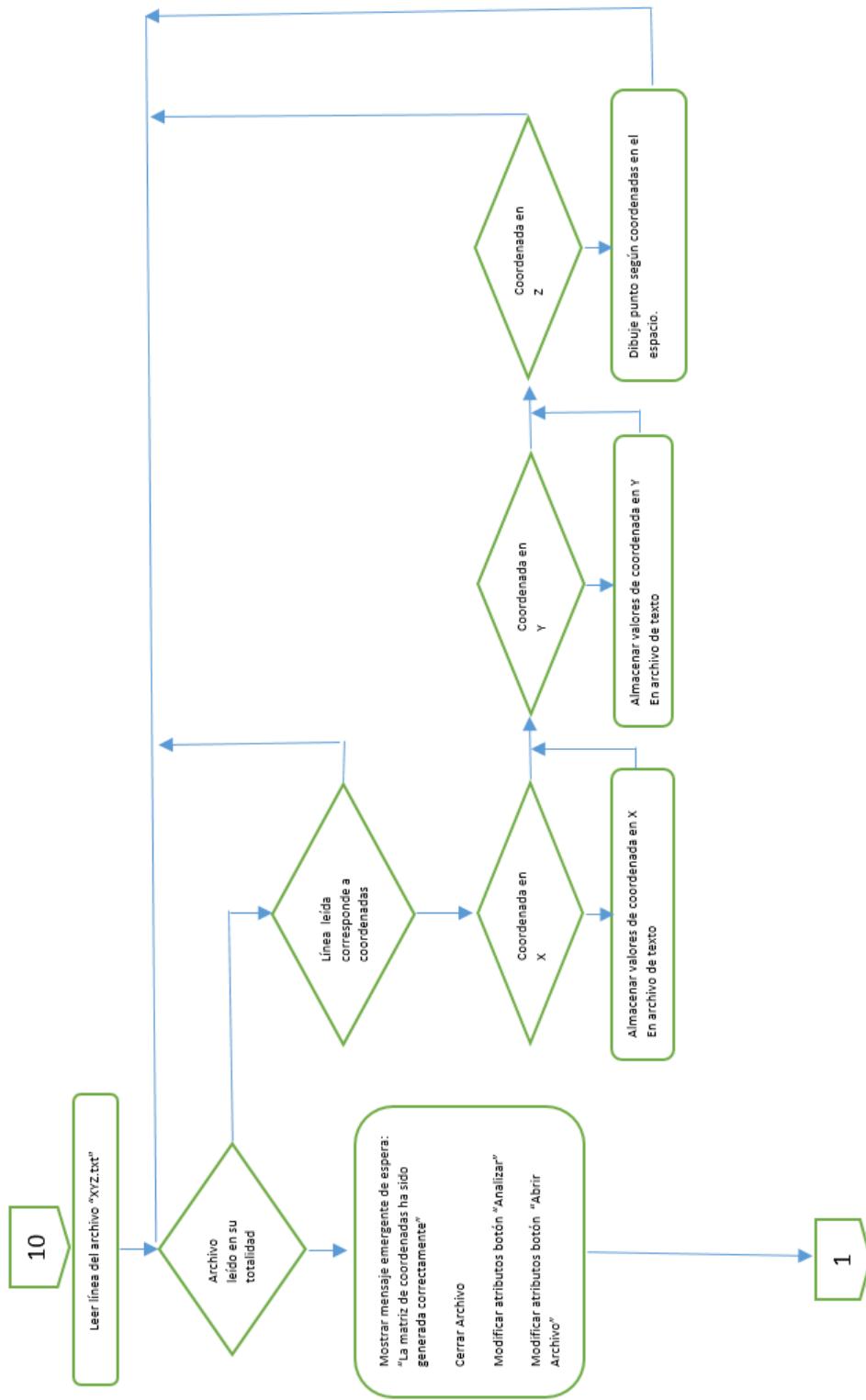


Figura 97. Diagrama de flujo (6)



Figura 98. Diagrama de flujo (7)

