



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE ROBOT DELTA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Autor: Guillermo Cabezas López
Tutor: Antonio Tristán Vega

Valladolid, mayo, 2021

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es realizar el diseño de un robot paralelo Delta en plástico que sea completamente funcional, con fines educativos, analizando previamente la cinemática de los modelos presentes actualmente en el mercado, y ser capaz de obtener un prototipo haciendo uso de tecnología de impresión 3D.

En primer lugar, se realizará un estudio de la topología de un robot Delta comercial, llegando a la conclusión que es imposible reproducir las rótulas con las que suelen contar este tipo de robots mediante impresión 3D en plástico. Ante esta complicación se rediseñará el robot con unos nuevos pares cinemáticos asegurándose de que no conlleva una pérdida de movilidad. Se calculará la cinemática inversa del robot obteniendo las ecuaciones que definen su movimiento, para así poder implementarlas en un software de control realizado con el lenguaje de programación Python, que a su vez se comunicará con tres servomotores trabajando en lazo abierto, que se encargarán de llevar a efecto dicho movimiento.

Se presentarán a su vez el hardware y componentes necesarios para la construcción del robot, dentro de los que se incluye el diseño mediante software informático de las piezas del mismo. Se mostrará el montaje del robot completo, incluyendo un soporte ajustable para facilitar su manejo. Por último, se evaluarán tanto el alcance como la repetibilidad del elemento terminal del robot mediante una serie de ensayos. Para reforzar el carácter pedagógico del proyecto se ha escogido usar tanto software como hardware abierto.

Palabras clave: robot paralelo, robot Delta, impresión 3D, cinemática inversa.

ABSTRACT

The objective of this project is to design a functional parallel Delta robot, for educational purposes, previously analysing the kinematics of the models currently available on the market, and to be able to obtain a prototype using 3D printing technology.

Firstly, a study of the topology of a commercial Delta robot will be carried out, reaching the conclusion that it is impossible to reproduce the ball joints that these types of robots are usually made of by 3D printing in plastic. With this pitfall in mind, the robot will be redesigned with new kinematic pairs, ensuring that there is no loss of mobility. The inverse kinematics of the robot will be calculated, obtaining the equations that define its movement, in order to implement them in a control software coded with the Python programming language, which will communicate with three servomotors working in open loop, which will be responsible for carrying out this movement.

The hardware and components necessary for the construction of the robot will also be presented, including the design of its parts using computer software. The assembly of the complete robot will be shown, including an adjustable support to facilitate its handling. Finally, both the range and repeatability of the robot's terminal element will be evaluated by conducting a series of tests. To reinforce the pedagogical character of the project, it has been chosen to use both open software and hardware.

Key words: parallel robot, Delta robot, 3D printing

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Antonio Tristán Vega por su tiempo, dirección y consejos que han sido imprescindibles y sin los cuales no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

A mis padres y a mi pareja por todo el apoyo, la paciencia y los ánimos que me han dado durante esta etapa y todas las que la han precedido.

Muchas gracias.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivación del proyecto	2
1.3. Objetivos del proyecto	3
1.4. Materiales y métodos	3
1.5. Estructura del proyecto	4
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1. La robótica industrial	7
2.1.1. Clasificación en función de su topología	8
2.2. Historia de los robots paralelos	11
2.3. Robot Delta	14
2.4. Ejemplos comerciales	15
2.4.1. Robots Delta Igus	15
2.4.2. Robot Delta FANUC DR-3iB/8L	16
2.4.3. Robot Delta Omron “3 axes + 1 rot series”	17
3. ANÁLISIS Y SÍNTESIS CINEMÁTICOS	19
3.1. Introducción	19
3.2. Análisis topológico y de movilidad	19
3.3. Análisis del movimiento: estudio de la cinemática	22
3.4. Cinemática inversa del robot Delta	23
4. FABRICACIÓN DEL ROBOT	31
4.1. Introducción	31
4.2. Componentes de control	31
4.2.1. Actuadores	31
4.2.2. Placa de control	32
4.2.3. Alimentación	34
4.3. Diseño de las piezas	35

4.3.1.	Articulación primaria	36
4.3.2.	Articulación secundaria	38
4.3.3.	Plataforma inferior	40
4.3.4.	Barras	43
4.3.5.	Base superior y sujección de motores	45
4.3.6.	Elementos auxiliares	46
4.4.	Montaje	47
5.	RESULTADOS	51
5.1.	Introducción	51
5.2.	Ensayos de repetibilidad	53
6.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	57
6.1.	Conclusiones	57
6.2.	Líneas futuras	58
	BIBLIOGRAFÍA	59
A.	ANEXO A: Impresión 3D	61
A.1.	Introducción	61
A.2.	Equipo utilizado	61
A.3.	Parámetros de impresión	63
B.	ANEXO B: Interfaz gráfica del programa	65
B.1.	Introducción	65
B.2.	Interfaz	65
C.	ANEXO C: Ensayos	69
C.1.	Ensayo 1 - Coordenada objetivo (4,3,-10)	70
C.2.	Ensayo 2 - Coordenada objetivo (-2,-4,-8)	72
C.3.	Ensayo 3 - Coordenada objetivo (5,-1,-5)	74
C.4.	Ensayo 4 - Coordenada objetivo (-3,2,-9)	76
C.5.	Ensayo 5 - Coordenada objetivo (0,0,-13)	78

D. ANEXO D: Análisis económico	81
D.1. Introducción	81
D.2. Aproximación a los costes	81
E. ANEXO E: Planos	83

Índice de figuras

1.	Distintos tipos de articulaciones para robots [5]	8
2.	Clasificación en función de su topología [4]	10
3.	Robot paralelo patentado por Willard L.V Pollard [8]	11
4.	Vista plana de un robot de: a) cadena abierta; b) cadena cerrada. [9] . . .	11
5.	Plataforma de Stewart [10]	12
6.	Robot Delta asistiendo en quirófano con el desplazando de cámaras [1] . .	14
7.	a) Robot Delta 3 GDL [15]. b) Robot Delta 4 GDL [14]	15
8.	Robot Delta de Igus [13]	15
9.	Robot Delta FANUC DR-3iB/8L [14]	16
10.	Robot Delta Omron [15]	17
11.	Robot Delta usando rótulas	19
12.	Esquema con pares de revolución	21
13.	Cinemática directa e inversa [5]	23
14.	Esquema del robot	24
15.	Ejemplo 1	27
16.	Ejemplo 2	28
17.	Ejemplo 3	28
18.	Ejemplo 4	29
19.	Servomotor MG996R	32
20.	Placa Arduino MEGA	33
21.	Placa Arduino UNO R3	34
22.	Robot Delta detallado	35
23.	Idea de diseño 1	36
24.	Idea de diseño 2	37
25.	Idea de diseño 3	37
26.	Comparación entre sistema de tope	38
27.	Brazo superior	38
28.	Articulación secundaria, versión 1	39
29.	Articulación secundaria, versión 1 impresa	39

30.	Casquillo de sujección interior	39
31.	Casquillo de sujección interior, versión impresa	39
32.	Articulación secundaria, modelo 2, sin y con geometría modificada	40
33.	Comparación entre modelos de articulaciones secundarias	40
34.	Base inferior	41
35.	Comparación de los espesores de la base inferior	41
36.	Pieza de unión	42
37.	Ensamblaje de la base inferior	42
38.	Modelo de base inferior reducido	43
39.	Barra de prueba	43
40.	Rotura de barra de prueba	44
41.	Surcos en la superficie de la barra	44
42.	Barra final	45
43.	Soporte servomotor	45
44.	Plataforma superior	46
45.	Punta para pruebas	46
46.	Ensamblaje brazos - base	47
47.	Sistema telescópico de una pata del soporte	48
48.	Robot ensamblado	48
49.	Simulación considerando el punto final	52
50.	Simulación del rango máximo por capas	52
51.	Disposición del ensayo de repetibilidad	53
52.	Representación del ensayo	55
53.	Anet A8	61
54.	Creality Ender 3	62
55.	Sistema de relleno por rejilla	63
56.	Sistema de relleno cúbico	63
57.	Interfaz gráfica del programa	65
58.	Error de coordenada inalcanzable	66
59.	Ventana emergente al cerrar el programa	67

60.	Representación del ensayo 1	71
61.	Representación del ensayo 2	73
62.	Representación del ensayo 3	75
63.	Representación del ensayo 4	77
64.	Representación del ensayo 5	79

Índice de tablas

1.	Valores finales de los parámetros dimensionales	51
2.	Resultados del ensayo	54
3.	Media y varianza para los datos del ensayo	55
4.	Parámetros piezas impresas	64
5.	Resultados del ensayo 1	70
6.	Media y varianza para los datos del ensayo 1	71
7.	Resultados del ensayo 2	72
8.	Media y varianza para los datos del ensayo 2	73
9.	Resultados del ensayo	74
10.	Media y varianza para los datos del ensayo 3	75
11.	Resultados del ensayo 4	76
12.	Media y varianza para los datos del ensayo 4	77
13.	Resultados del ensayo 5	78
14.	Media y varianza para los datos del ensayo 5	79
15.	Costes aproximados	82

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

El campo de la robótica ha cambiando la forma de la que se realizan los procesos productivos en la mayoría de empresas. Cuando hablamos de un robot, se piensa en robots antropomórficos, cuya forma y movimiento se podría asemejar a los de un brazo humano. Sin embargo, el campo de la robótica es increíblemente extenso, y a cada día que pasa surgen nuevos modelos y sistemas.

Los robots se pueden clasificar en función de una serie de criterios [1]:

- Grados de libertad. En un caso ideal el manipulador posee 3 grados de libertad (3 de rotación y 3 de traslación) que le permiten desplazarse a cualquier punto del espacio. Pueden llegar a existir robots con más grados de libertad, pero se consideran redundantes.
- Estructura cinemática. Esto viene definido por la topología estructural del robot, y puede diferenciarse entre robot serie (si posee una única cadena abierta) o robot paralelo (en el caso de ser una cadena cerrada). También pueden existir robots mixtos.
- Tecnología de los actuadores: En este caso nos referimos a si los actuadores son de carácter eléctrico, neumático o hidráulico.
- Geometría de trabajo: Este espacio viene definido por el volumen físico al que llega el elemento terminal del robot. Puede ser cartesiano, cilíndrico o esférico.

En este trabajo nos vamos a centrar en el segundo punto, los robots serie y paralelo. En el caso de los robots paralelo, la relación entre la base y el elemento terminal se encuentra definido por una única cadena de eslabones. Esto tiene efectos en su movimiento, ya que al funcionar los actuadores y desplazar el elemento terminal, la velocidad y aceleración que han proporcionado puede provocar una inercia en el elemento terminal que resulte en una mala exactitud final. Aquí entra en juego la rigidez del robot, que dependerá tanto del tamaño y material como de los actuadores utilizados y sus sistemas de transmisión. En el caso de los robots serie la cinemática directa es muy sencilla de calcular, pero la cinemática inversa puede ser muy compleja de obtener. Para un punto dado, podríamos obtener un número infinito de soluciones.

Por el contrario, los robots paralelos están compuestos por dos o más cadenas cinemáticas cerradas. Entre la plataforma móvil y fija se encuentran cada una de las cadenas serie (a las que en este trabajo nos referiremos como “brazos”). Como para levantar la misma carga que un robot serie los robots paralelos lo reparten entre más actuadores, éstos pueden trabajar con rangos de cargas mayores. Al poseer más de una cadena entre

las bases, estos robots poseen una mayor rigidez y limita la inercia resultante en el elemento terminal. El aumentar el número de cadenas también acarrea inconvenientes, ya que los robots paralelo poseen espacio de trabajo más pequeños, y los sistemas de control son mucho más complejos. En cuanto al cálculo de la cinemática ocurre al contrario, ya que resulta más sencillo calcular la cinemática inversa mientras que no siempre es posible obtener una solución única para la cinemática directa.

1.2. Motivación del proyecto

El avance del campo de la robótica trae consigo la necesidad de personal cualificado que sepa de su funcionamiento y estructura. Como tal, la universidad es la encargada de formar a los futuros ingenieros que se integrarán en el mercado laboral, con los conocimientos y capacidades necesarias para poder desenvolverse en dicho entorno.

Por ello, el poseer un prototipo que sirva de muestra de estudio para los estudiantes es de gran utilidad, permitiéndoles observar y aprender de una manera más profunda que si simplemente se estudiase teóricamente. Por esta razón, para beneficio de los estudiantes que se encuentran ahora mismo formándose, se realiza este trabajo. Para reforzar esto, las herramientas utilizadas (tanto software como hardware) son de código abierto, por lo que cualquier estudiante puede hacer uso de ellas sin necesidad de realizar un desembolso económico. En el primer anexo de este documento se mostrará también las especificaciones utilizadas para la impresión de las piezas para así facilitar su repetibilidad.

Actualmente en la escuela encontramos otros robots accesibles por los estudiantes (desde más sencillos como un SCORBOT hasta más complicados como robots antropomórficos de ABB), pero poseen restricciones a la hora de observar sus componentes y su funcionamiento. Con este proyecto, se quiere presentar un robot que sea totalmente accesible al estudiante, donde se puedan observar las piezas por separado y en su conjunto, analizar el sistema de control y las conexiones con una placa Arduino, observar como se puede integrar una interfaz gráfica que pueda comunicarse con un ordenador y, especialmente, el control cinemático de los servomotores que gobiernan las acciones del robot. Por el contrario en el caso del SCORBOT, robot usado por los alumnos en prácticas del área de mecánica, su cinemática queda oculta, sin poder obtener acceso a ella.

La razón por la que se ha decidido usar impresión 3D para la fabricación de las piezas es debido a la velocidad con la que podemos obtener un prototipo y la capacidad de obtener una copia rápida de una pieza en caso de necesidad. Esto sumado a que en la actualidad existen opciones más económicas de impresoras 3D, hace que sea un sistema más accesible para la producción del robot.

1.3. Objetivos del proyecto

El objetivo principal es obtener un prototipo funcional de un robot Delta, accesible para poder realizar actividades relacionadas con la enseñanza en el área de Ingeniería Mecánica, y en concreto en las asignaturas de Mecánica de Robots y de Máquinas y Mecanismos, impartidas en el grado de Ingeniería Industrial Mecánica.

- Analizar la movilidad de un robot Delta real.
- Ante la incapacidad de reproducirse con plástico, sintetizar una topología que conserve la movilidad y sea compatible con sistemas de impresión 3D.
- Obtener una serie de ecuaciones cerradas para el cálculo de la cinemática inversa que nos proporcione control en tiempo real sobre los actuadores del motor.
- Diseñar las piezas necesarias para ensamblar un modelo funcional del robot, haciendo uso de una impresora 3D.
- Fabricar las piezas diseñadas usando tecnología de impresión 3D, de tal forma que sea posible reemplazarlas fácilmente por otras en caso de rotura o desgaste.
- Crear una interfaz gráfica en Python capaz de comunicarse y controlar el robot, haciendo uso de servomotores gobernados por una placa de Arduino.
- Realizar un estudio de la capacidad de repetibilidad en el posicionamiento del elemento terminal.

1.4. Materiales y métodos

Como se ha indicado antes, una parte importante de este proyecto es poder permitir que se pueda replicar el robot con facilidad. Por eso mismo presentamos una breve lista de los elementos y utilizados en este trabajo:

- Impresoras 3D dentro del rango económico como son la Anet A8 y la Creality Ender 3, usando PLA como material para la fabricación de piezas.
- Para el cálculo de la cinemática inversa se ha hecho uso de Python. También se ha usado el módulo de Tkinter para la realización de la interfaz gráfica y el módulo de Pyfirmata para la conexión con el entorno de Arduino.
- Como programa de diseño asistido por ordenador se ha hecho uso de FreeCAD 0.18, con el que también se han generado los ficheros STL.
- Slicer Ultimaker Cura 4.8.0 como software para convertir los ficheros STL en GCODE, ajustando los parámetros a los requisitos de impresión.

- Para la realización de esta memoria se ha hecho uso del sistema de composición de textos LaTeX usando los servicios de Overleaf para su compilación.

De forma análoga, los materiales usados en la creación del robot serían los siguientes.

- Servomotores MG996R como los actuadores de los 3 brazos del robot.
- Placa de Arduino como elemento de comunicación actuador-ordenador.
- Bobinas de PLA de diferentes colores.
- Tornillos de métrica 4mm, de 16 y 20mm de longitud. Para asegurarlos se ha hecho uso de tuercas autoblocantes de la misma métrica.
- Tubos de aluminio de 10 y 8mm para realizar el soporte.
- Una fuente de alimentación para proporcionar corriente a los servomotores. Se usó también una placa de pruebas de electrónica para poder realizar las conexiones y repartir la tensión.

A lo largo de esta memoria se ampliará la información sobre los elementos usados.

1.5. Estructura del proyecto

Este Trabajo Fin de Máster tendrá la siguiente estructura:

- **CAPÍTULO 1:** Introducción del tema de este trabajo, mostrando la motivación por la que se ha escogido este tema. También quedan indicados los objetivos del proyecto y una breve enumeración de los materiales utilizados.
- **CAPÍTULO 2:** Descripción para dar a conocer los robots paralelos, algunos ejemplos y algo más en detalle de los robots Delta.
- **CAPÍTULO 3:** Se realizará un análisis de un robot Delta real y se propondrán modificaciones del diseño para su adaptación a la metodología de impresión 3D. También se indicarán las ecuaciones que se usarán para definir el movimiento.
- **CAPÍTULO 4:** Se indicarán los componentes a partir de los que se realiza el prototipo del robot y se mostrarán las piezas diseñadas en FreeCAD, explicando ligeramente la evolución de su diseño.
- **CAPÍTULO 5:** Se mostrarán las simulaciones y los ensayos realizados con el robot. El objetivo principal es obtener la certeza de su capacidad de repetibilidad a la hora de alcanzar diversas posiciones.

- CAPÍTULO 6: Se expondrá la conclusión del proyecto, así como posibles ideas futuras si se quisiese expandir su uso.
- Bibliografía.
- ANEXO A: Explicación breve de los parámetros usados a la hora de la impresión 3D, con una estimación aproximada de tiempo de impresión y material utilizado.
- ANEXO B: Presentación detallada de la interfaz gráfica diseñada para el control del robot, con las nociones suficientes para permitir que cualquier persona sea capaz de controlar el robot.
- ANEXO C: Breve análisis de costes, indicando los criterios y aproximaciones en alguno de los elementos.
- ANEXO D: Plano de conjunto y planos de las piezas diseñadas en FreeCAD.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. La robótica industrial

En primer lugar hay que definir qué es un robot industrial. La principal distinción viene dada por el nivel de complejidad y sofisticación en cuanto a su programación [2]. Esta es la razón de que una máquina de control numérico por computador (CNC) no se le pueda denominar como robot, a pesar de ser capaz de realizar tareas de manera automática. La diferencia principal entre un robot y una máquina de CNC es que el robot puede contar con una gran variedad de herramientas y que puede usarlas en un entorno de trabajo cuyo volumen es mucho mayor al del propio robot.

Aunque existen muchas definiciones de qué es un robot industrial, existe un consenso común alrededor de la definición proporcionada por la Organización Internacional de Normalización (ISO): “un robot industrial es una máquina controlada de forma automática, reprogramable, con un manipulador multifunción, con 3 o más grados de libertad, que puede estar fijo en un lugar o móvil para ser usado en operaciones de automatización industrial.” [3]

Todos los robots industriales vienen caracterizados por una serie de propiedades [4]:

- Número de grados de libertad: Viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones de los robots. Para aplicaciones industriales generales se requieren 6 GDL, pero pueden ser necesarios más para operaciones más complejas.
- Espacio de trabajo: El volumen definido por el conjunto de puntos accesibles por el punto terminal, y depende de la configuración y tamaño de las articulaciones del robot. Si es posible acceder a uno de esos puntos desde cualquier orientación del robot, decimos que es un punto totalmente accesible. Si tan solo es posible alcanzarlo con algunas orientaciones, decimos que es entonces un punto parcialmente accesible.
- Posicionamiento de punto terminal: La capacidad que tiene un robot de alcanzar el punto objetivo requerido por el usuario viene dado por tres magnitudes:
 - Resolución espacial: Incremento más pequeño que puede realizar el robot
 - Precisión: Capacidad de posicionar el punto terminal en el punto del espacio objetivo con el menor error posible.
 - Repetibilidad: Capacidad de regresar al mismo punto desde distintos puntos. Se valora el error medio cometido entre todas estas repeticiones.
- Capacidad de carga: Es un parámetro muy importante e influye en gran medida en el tipo de operaciones en las que puede trabajar. Será un punto crítico de análisis cuando se quiera adquirir un robot industrial.

- Velocidad: El parámetro importante es la máxima velocidad que alcanza el punto terminal y el cuerpo del robot. Es importante tanto para la productividad del proceso como para la seguridad de los trabajadores.

2.1.1. Clasificación en función de su topología

La elección del tipo de articulaciones de un robot definen las características del mismo y genera una serie de configuraciones. Las articulaciones pueden ser de desplazamiento, giro, o una combinación de ambas. En la Fig.1 podemos observar los 6 tipos diferentes de articulaciones que existen [5]:

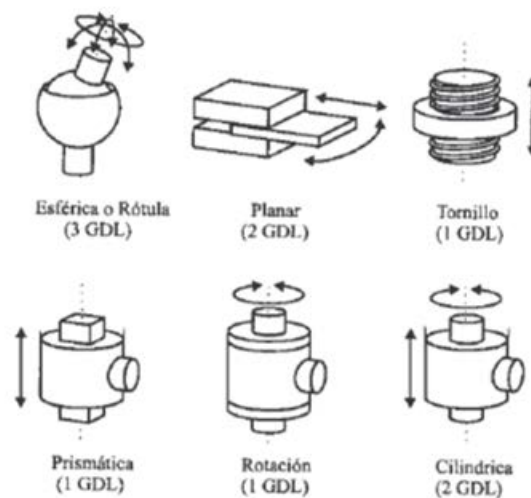


Figura 1: Distintos tipos de articulaciones para robots [5]

Dichas configuraciones hacen referencia a las tres primeras articulaciones del manipulador [6]. Siguiendo este criterio tenemos:

- Configuración cartesiana: Las tres primeras articulaciones son prismáticas y se trabaja con coordenadas cartesianas. Se necesita un espacio de trabajo amplio, no es apto para espacios cerrados, pero posee gran rigidez.
- Configuración cilíndrica: Tiene una primera articulación cilíndrica seguida de dos cartesianas. Es necesario realizar los cálculos con coordenadas cilíndricas, y es muy útil en operaciones en las que las tareas que debe realizar están situadas a su alrededor.
- Configuración polar/esférica: Viene definida por dos articulaciones esféricas, seguida de una tercera que puede ser esférica o prismática. Se deberá trabajar con coordenadas polares.

- Configuración SCARA: Esta configuración concreta viene definida por dos articulaciones de rotación en el mismo plano y una prismática en su eje vertical. Esta configuración es muy utilizada en tareas de ensamblado.
- Configuración paralelo: En esta configuración el factor relevante es que el elemento terminal se encuentra conectado a la base por como mínimo dos cadenas cinemáticas diferentes. Dentro de este tipo de robots existen muchas geometrías diferentes, pero todas tienen en común que su espacio de trabajo es más reducido.

En la figura 2 se muestran con más claridad las configuraciones comentadas:

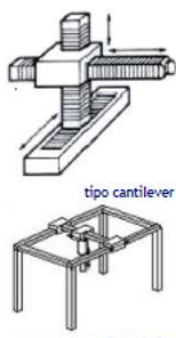


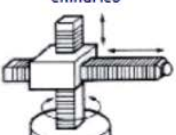
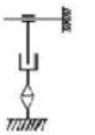





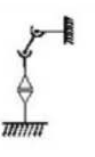


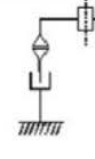




Topología	Estructura cinemática	Espacio de trabajo
<p>cartesianos</p>  <p>tipo cantilever</p> <p>tipo pórtico</p>		
<p>cilíndrico</p> 		
<p>polar</p> 		
<p>esférico</p> 		
<p>SCARA</p> 		
<p>paralelo</p> 		

Figura 2: Clasificación en función de su topología [4]

2.2. Historia de los robots paralelos

Las estructuras mecánicas paralelas se remontan antes incluso que la robótica, de la mano de ingenieros ingleses y franceses con estudios sobre aplicaciones de poliedros. El primer ejemplo de esto fue una base para ubicar los asientos de un teatro, patentada en 1931 por James E. Gwinnett [7].

El primer robot industrial paralelo fue creado en 1940 por Willard L.V Pollard, con 5 grados de libertad, 3 para posición y 2 para orientación, cuya finalidad era realizar operaciones de pintura con spray [8] (véase Fig.3). Ninguno de estos dos diseños llegó a fabricarse.

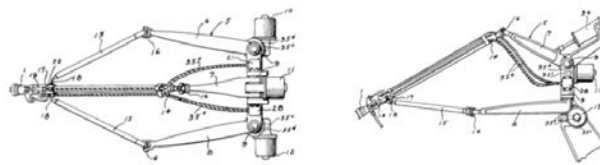


Figura 3: Robot paralelo patentado por Willard L.V Pollard [8]

Un robot paralelo es aquél que se diseña como una cadena cinemática cerrada, al contrario de lo que ocurre con los tradicionales robots serie o en cadena abierta. Para entender mejor estos términos vamos a observar la figura 4 que presenta el diagrama cinemático de dos robots, uno de cadena abierta y otro de cadena cerrada [9].

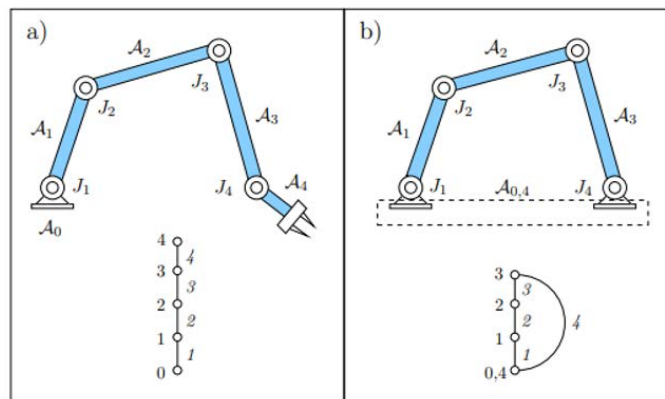


Figura 4: Vista plana de un robot de: a) cadena abierta; b) cadena cerrada. [9]

Basándonos en la figura 4, podemos decir que es una cadena cerrada cuando sobre el diagrama cinemático observamos un bucle. En cualquier otro caso decimos que al cadena será abierta.

- Cadena abierta: “Una cadena abierta es una combinación sucesiva de articulaciones en la cual el elemento terminal se puede mover libremente”.

- Cadena cerrada: “Una cadena

Por tanto, el que los robots paralelos estén formados por una o más cadenas cerradas proporciona una serie de ventajas sobre los robots serie [1]. La más aparente es la capacidad de levantar mayores cargas, ya que dicho peso se divide entre los actuadores de las diferentes cadenas. Gracias a la existencia de otros brazos, podemos mitigar la inercia de la base móvil cuando se desplaza, permitiendo tener una mayor precisión que si solo se tuviese una cadena abierta. Estas dos ventajas anteriores también afecta a la mejora de la rigidez de la estructura del robot, ya que permite tener un mejor control y someter sus componentes a menores esfuerzos. Por consecuencia, esto permite poder alcanzar mayores velocidades de movimiento manteniendo una alta precisión final de la herramienta.

Si quisiésemos realizar una clasificación de los robots paralelos, de forma general se dividen teniendo en cuenta sus grados de libertad o por su tipo de movimiento. Siguiendo esto último, la clasificación sería la siguiente:

- Robots paralelos traslacionales: La plataforma móvil puede desplazarse en cualquier dirección pero no puede rotar. Un ejemplo son los robots Delta.
- Robots paralelos esféricos: también conocidos como muñecas esféricas, su plataforma solo puede orientarse en una dirección, pero no es capaz de desplazarse.
- Robots paralelos mixtos: En este caso la plataforma puede desplazarse y orientarse a la vez. Este es el caso de la plataforma de Stewart, creada en 1965, cuyas articulaciones eran todas esféricas y es la base de aplicaciones como por ejemplo, de simuladores de vuelo (Fig.5).

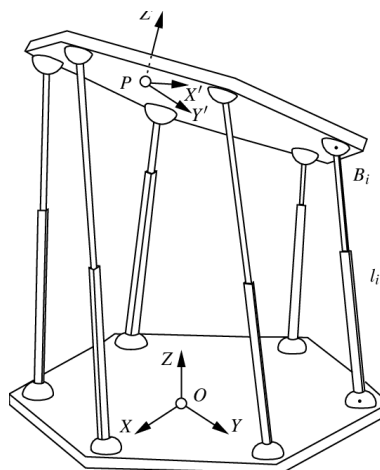


Figura 5: Plataforma de Stewart [10]

Aunque útil, esta plataforma era muy costosa de producir y la dificultad de análisis de la cinemática era muy elevada. En el año 1990, el ingeniero suizo Reymond Clavel modificó

la plataforma de Stewart, reduciendo las cadenas cinemáticas a 3 que servirán de “brazos” del manipulador, y colocando los actuadores en la plataforma fija, permitiendo al robot alcanzar mayores aceleraciones al disminuir así la masa a desplazar. Esta modificación es lo que conocemos como robot Delta.

2.3. Robot Delta

De entre los robots paralelos existentes, uno de los más presentes a nivel industrial es el robot Delta, que destaca por su reducido peso y su gran velocidad de movimiento. A su vez posee una configuración sencilla a base de paralelogramos que aseguran que la plataforma inferior siempre esté en horizontal sin tener que controlarla directamente [11]. Su función principal en un entorno productivo es realizar operaciones de “pick and place”, en las que se requiere reposicionar objetos, generalmente de una forma precisa y muy rápida. En primer lugar se utilizaban mayoritariamente en empresas alimenticias, debido a su fácil limpieza y sencillez de la estructura. Con el paso de tiempo, su uso se ha ido extendiendo hasta la actualidad donde podemos encontrarlos incluso en quirófanos de hospitales (Fig.6).



Figura 6: Robot Delta asistiendo en quirófano con el desplazando de cámaras [1]

Existen dos tipos de robot Delta:

- Con 3 grados de libertad, los 3 de traslación (Fig.7.a).
- Con 4 grados de libertad, 3 de traslación y 1 de rotación. En estos últimos existe un cuarto brazo, conectado desde el centro de la base, que se encarga de controlar dicha orientación de la plataforma final (Fig.7.b).

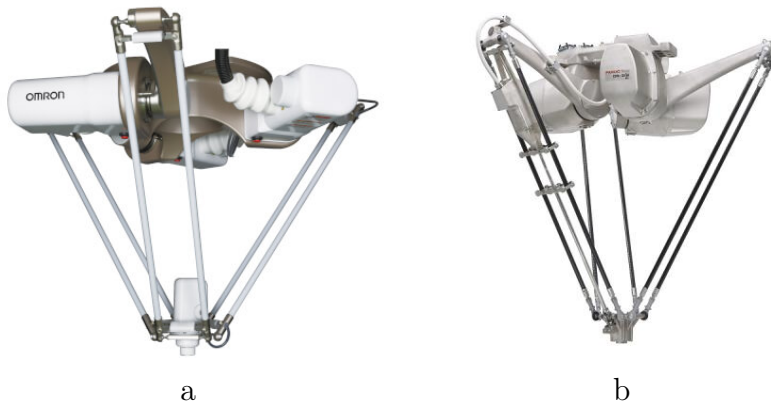


Figura 7: a) Robot Delta 3 GDL [15]. b) Robot Delta 4 GDL [14]

Debido a las altas necesidades de precisión y repetibilidad el coste de este robot es muy elevado, y el hecho de que sus articulaciones sean esféricas limitan el uso de materiales para su fabricación, utilizándose principalmente aluminio y otros metales.

2.4. Ejemplos comerciales

En este apartado queremos dar un poco de contexto sobre los robots Delta que existen en la actualidad y que están disponibles para su compra.

2.4.1. Robots Delta Igus

Igus fabrica robots Delta ligeros y económicos para tareas de montaje y de pick and place de 3 GDL. Está fabricado con plástico y aluminio para obtener un bajo peso.



Figura 8: Robot Delta de Igus [13]

Sus especificaciones son[13]:

- Repetibilidad: $\pm 0,5\text{mm}$
- Alcance vertical: 75mm
- DAlcance horizontal: 180mm

- Carga máxima: 5kg
- Peso: 15kg
- Velocidad máxima: 3m/s

Esta empresa se centra en la venta de kits modulares, donde puedes comprar el robot individualmente, o con diferentes tipos de soportes. También proporcionan la opción de comprar el robot sin los motores por si el cliente tuviese unos requisitos específicos. Por esto, sus kits rondan un precio entre los 3.150 y 5.795€

2.4.2. Robot Delta FANUC DR-3iB/8L

FANUC es uno de los fabricantes de robots más conocidos, y también oferta su propia gama de robots Delta. En este caso se trata del robot DR-2iB/8L, un robot delta de 4 GDL de alto rendimiento.



Figura 9: Robot Delta FANUC DR-3iB/8L [14]

Sus especificaciones son [14]:

- Repetibilidad: $\pm 0,03\text{mm}$
- Alcance vertical: 500mm
- DAlcance horizontal: 1600mm
- Carga máxima: 8kg
- Peso: 170kg
- Velocidad máxima: 10.000m/s

Como se puede observar de las especificaciones, este es un robot mucho más grande y con una capacidad bastante mayor. FANUC indica que este es un modelo de alto rendimiento, indicado para aplicaciones en el sector alimentario y farmacéutico.

2.4.3. Robot Delta Omron “3 axes + 1 rot series”

Omron es una empresa que ofrece una gran variedad de robots Delta. Su gama “3 axes + 1 rot series” incluye robots de diversos tamaños y capacidades que el cliente puede escoger si desea que tengan 3 ó 4 GDL. Éste es un cambio en la capacidad de la orientación, pero no se realiza ningún otro cambio al robot. A su vez, cada una de estas versiones dispone a su vez de variantes con protección hermética al polvo y/o inmersión IP65, IP67 e IP69K, y entre todas las versiones proporciona robots con capacidades de carga entre 1 y 8kg.



Figura 10: Robot Delta Omron [15]

Para comparar las características hemos seleccionado dos modelos de la gama con protección IP65 (equipo hermético al polvo y protegido contra el agua proyectada) [15]:

Omron CR_UGD4_XXLH:

- Repetibilidad: $\pm 0,5\text{mm}$
- Alcance vertical: 550mm
- DAlcance horizontal: 1600mm
- Carga máxima: 10kg
- Peso: 115kg
- Hasta 60 ciclos por minuto

Omron R_UGD4_XL:

- Repetibilidad: $\pm 0,2\text{mm}$
- Alcance vertical: 400mm
- DAlcance horizontal: 1300mm
- Carga máxima: 2kg

- Peso: 65kg
- Hasta 120 ciclos por minuto

3. ANÁLISIS Y SÍNTESIS CINEMÁTICOS

3.1. Introducción

Como se ha indicado en el primer capítulo de este proyecto, la finalidad es conseguir crear un robot Delta mediante plástico usando impresión 3D, limitando el uso de otros materiales a elementos de unión, actuadores y elementos de control. Debido a esto, es imposible recrear un robot Delta exactamente igual que si se realizase en metal ya que, como se ha visto en el capítulo anterior, usa pares cinemáticos esféricos como articulaciones, cosa que no es posible repetir con fiabilidad y precisión mediante una impresora de 3D. Por ello, se ha debido buscar una alternativa que sí tenga una fabricación factible manteniendo la capacidad de movimiento que tenemos con un robot Delta fabricado en metal.

3.2. Análisis topológico y de movilidad

En primer lugar debemos identificar los movimientos que ocurren en un robot Delta típico. Por cada brazo posee 8 rótulas, cada una de ellas proporcionando 3 grados de libertad de rotación (Fig.11).



Figura 11: Robot Delta usando rótulas

Si observamos su estructura, la parte inferior está formada por 3 paralelogramos articulados que, debido a su geometría, mantiene la arista de la base inferior paralela a la de la base superior, asegurando entonces que en cualquier momento la plataforma inferior se mantiene horizontal. Para conocer el número de grados de libertad usaremos el criterio de Grübler-Kutzbach [16].

Para mecanismos planos:

$$G = 3(N - 1) - 2P_I - P_{II} \quad (1)$$

Para mecanismos espaciales con un eslabón fijo:

$$G = 6(N - 1) - 5P_I - 4P_{II} - 3P_{III} - 2P_{IV} - P_V \quad (2)$$

Donde:

- G: es el número de grados de libertad del mecanismo; por ser holónimo, coincidirá con el número de grados de libertad.
- N: es el número de eslabones (partes móviles y bancada) del mecanismo.
- P_I : representa los pares cinemáticos de tipo I. Permiten 1 GDL, eliminando 2 GDL.
- P_{II} : representa los pares cinemáticos de tipo II. Permiten 2 GDL, eliminando 1 GDL.
- P_{III} : representa los pares cinemáticos de tipo III. Permiten 3 GDL, eliminando 3 GDL.
- P_{IV} : representa los pares cinemáticos de tipo IV. Permiten 4 GDL, eliminando 2 GDL.
- P_V : representa los pares cinemáticos de tipo V. Permiten 5 GDL, eliminando 1 GDL.

Sin embargo, este criterio presenta limitaciones:

- En el espacio también existe un gran número de casos en los que no se verifica el criterio, por ejemplo el de la biela manivela.
- El número de grados de libertad de un mecanismo coincide con su movilidad sólo en el caso de ser un sistema holónimo. Un sistema es holónimo cuando el número de grados de libertad coincide con el número de coordenadas independientes. La no holonomía está asociada a mecanismos maniobrables, con lo que no suele ser un factor problemático a la hora de trabajar con robots manipuladores.
- Este criterio no es válido si existen enlaces redundantes (que no son necesarios para realizar el movimiento). En estos casos es necesario eliminar dichos enlaces redundantes antes de poder aplicar el criterio.

Para el análisis del robot Delta vamos a utilizar la ecuación 2. El robot Delta posee 11 eslabones sumando las bases y los brazos (la base superior funcionará como bancada) y 3 pares cinemáticos de tipo I en forma de los 3 pares de revolución gobernados por servomotores que controlan cada uno de los brazos. En total existen 12 pares cinemáticos de tipo III (rótulas), que permiten cualquier orientación relativa pero prohíben la traslación. Si sustituimos estos valores en la ecuación 2 obtenemos:

$$G = 6(11 - 1) - 5 * 3 - 3 * 12 = 60 - 15 - 36 = 9GDL \quad (3)$$

Observando la ecuación 3 hay que considerar que 3 de esos grados de libertad son los correspondientes a la traslación de la base inferior (la orientación de la base queda restringida por la propia estructura del robot). Los otros 6 GDL restantes corresponden a la rotación de las 6 barras alrededor de su propio eje. Esta rotación no aporta nada al movimiento del robot, y por lo tanto son prescindibles y podremos diseñar una articulación que sustituya a las rótulas.

Para realizar este cometido encadenaremos dos pares de revolución consecutivos cuyos ejes se cortan de manera perpendicular entre sí, como ocurre en una junta cardán. Así podremos obtener la misma capacidad de movimiento sin hacer uso de rótulas. Un esquema aproximado de cómo sería su distribución es el de la figura 12.

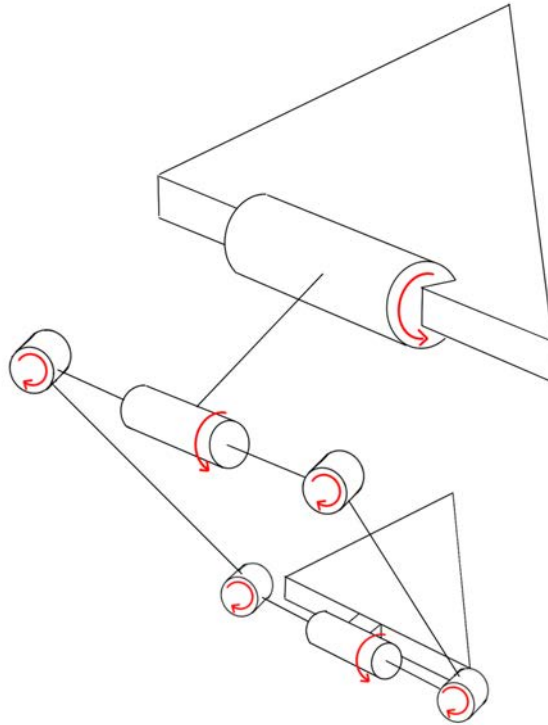


Figura 12: Esquema con pares de revolución

Cambiar las rótulas por pares de revolución implica que pasan de ser pares de tipo III a pares de tipo II (eliminan 4 GDL en vez de 3). Si repetimos el criterio de Grübler-Kutzbach:

$$G = 6(11 - 1) - 5 * 3 - 4 * 12 = 60 - 15 - 48 = -3GDL \quad (4)$$

El resultado de la ecuación 4 es negativo, y esto implica la existencia de redundancias de enlaces en el mecanismo. Centrándonos en un solo brazo, tenemos 4 pares de rotación que

forman el paralelogramo en la parte inferior del brazo. Nuestro objetivo era eliminar la rotación que tenía la barra sobre su propio eje, cosa que conseguimos gracias al par superior, pero que estamos teniendo en cuenta en el par inferior ya que, independientemente de que la articulación inferior deje libre la barra, la rotación de ésta sobre sí misma viene limitada por la forma de la que está ensamblada a la articulación superior. Por tanto, a los pares de revolución inferiores se les puede considerar que tan sólo eliminan 3 GDL, y que el cuarto no es necesario ya que existen otros pares cinemáticos que cumplen dicha función. Teniendo en cuenta esto y aplicando el criterio de Grübler-Kutzbach:

$$G = 6(11 - 1) - 5 * 3 - 4 * 6 - 3 * 6 = 60 - 15 - 24 - 18 = 3GDL \quad (5)$$

Observando entonces la ecuación 5 podemos afirmar que el nuevo diseño puede desempeñar la misma función que el de un robot Delta tradicional. El hecho de que existan redundancias supone una complicación del diseño mecánico, ya que si los pares de revolución no poseen la precisión suficiente pueden aparecer esfuerzos elevados en las piezas, pudiendo romperlas o al menos provocar un fallo por fatiga prematuro. Incluso, si la tolerancia en el proceso de fabricación es demasiado elevada, es posible perder la movilidad del conjunto.

3.3. Análisis del movimiento: estudio de la cinemática

Existen dos formas de calcular la cinemática de un robot: cinemática directa y cinemática inversa [5].

- La cinemática directa consiste en determinar la posición y orientación del elemento terminal del robot, respecto al sistema de referencia del robot y siendo conocidos los parámetros geométricos y los valores de sus pares cinemáticos. En el caso del robot Delta consistiría en calcular las coordenadas cartesianas del centro de la base inferior en función de los ángulos de giro de los servomotores de los brazos.
- Por el contrario, la cinemática inversa consiste en, conocidas la posición y orientación de dicho elemento terminal del robot, obtener los parámetros cinemáticos de las articulaciones. Aplicándolo a un robot Delta, consiste en obtener los valores de los ángulos de giro de los servomotores a partir de las coordenadas del elemento terminal, que será un dato de entrada.

En los robots serie siempre es posible realizar el cálculo de la cinemática directa, y haciendo uso de estándares como el de Denavit-Hartenberg [17] es posible conseguirla de manera sistemática. Por el contrario, no es posible sistematizar la cinemática inversa y requiere realizar uso de la heurística.

Tal y como se comentó en el capítulo 1.1, en el caso de los robots paralelos la cinemática directa no es sistematizable, y es posible demostrar que en muchos casos no existe una solución cerrada, teniendo que hacer uso frecuentemente de métodos numéricos.

En el caso del robot Delta sólo será posible realizar la cinemática inversa, de la cual sí conseguimos calcular una solución cerrada. Nosotros proporcionaremos al programa las coordenadas del punto final al que deseamos que llegue el robot, y calcularemos a partir de ahí los ángulos a los que deben estar los brazos para poder obtener dicha posición. Por cómo es la estructura del robot Delta no será necesario preocuparse por la orientación, ya que esta se mantendrá horizontal en todo momento.

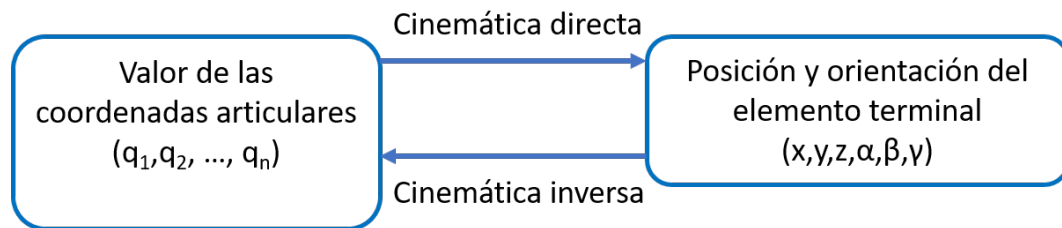


Figura 13: Cinemática directa e inversa [5]

3.4. Cinemática inversa del robot Delta

Como se ha descrito en el apartado anterior, la posición final de la base depende únicamente del ángulo de giro de los 3 actuadores rotativos para gobernar 3 GDL en la placa superior del robot. Este movimiento controla al desplazamiento de los 3 brazos, y su combinación nos proporciona el movimiento deseado.

Para comenzar, presentamos en la figura 14 el esquema de uno de los brazos, visto de frente y lateralmente, donde observamos cuáles serán los puntos de estudio. Nosotros siempre conoceremos los puntos O y O', siendo el primero el centro de la plataforma del robot, que se mantendrá fija y supondrá el origen de coordenadas para el mismo, y el segundo siendo el dato de entrada. Se han considerado los ejes de tal forma que el eje X está alineado con la dimensión significativa del brazo superior, el eje Z vertical y hacia arriba, y el eje Y completando el triedro. En la figura 14 se puede observar el esquema de uno de los brazos del robot con la notación de los parámetros que hemos considerado relevantes para realizar el estudio.

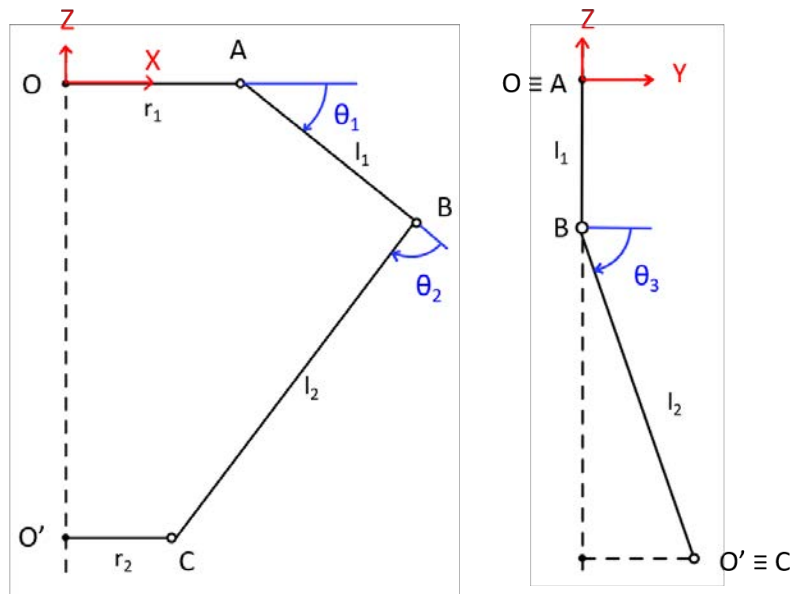


Figura 14: Esquema del robot

Consideraremos entonces:

- r_1 : Indica la distancia entre el centro de la plataforma base del robot y el punto donde se sitúa el anclaje del motor al brazo superior.
- r_2 : Será la distancia entre el centro de la plataforma móvil del robot y el punto donde se sitúa el anclaje al brazo.
- l_1 : Representa la longitud del brazo superior.
- l_2 : Representa la longitud de la parte inferior del brazo. En el capítulo 4 explicaremos que esta distancia es la del conjunto articulación-barra-articulación.
- θ_1 : Será el ángulo que forma la plataforma base con el primer brazo. Éste es el más relevante, ya que será el que controlemos con los servomotores.
- θ_2 : Indica el ángulo que forma el primer brazo con el segundo, alineado con θ_1 .
- θ_3 : Representa el ángulo que forma el primer brazo con el segundo, perpendicular a θ_2 .
- α : Tomará el valor de 0, 120 o 240 grados para representar cada uno de los tres brazos.

De la misma forma es fácil obtener las coordenadas de los puntos A y C, ya que conociendo la posición de las bases y su tamaño, sólo difieren en el plano horizontal de la base correspondiente a una cierta distancia fija r_1 y r_2 , respectivamente.

La verdadera incógnita del problema consiste en la posición del punto B y los ángulos de los brazos del robot.

El análisis del movimiento del brazo es el mismo en los 3, diferenciándose éstos en la orientación respecto al centro definido por el ángulo α , como se ha dicho antes. Como las plataformas del robot se mantienen horizontales en todo momento, basta con usar la matriz de rotación alrededor de un eje Z para definir la posición de los puntos:

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) & 0 \\ -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Si queremos particularizar la matriz que se usará en cada caso, sustituiremos α por 0, 120 ó 240 grados respectivamente:

$$R_{z1}(\alpha = 0^\circ) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_{z2}(\alpha = 120^\circ) = \begin{bmatrix} -1/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ -\sqrt{3}/2 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R_{z3}(\alpha = 240^\circ) = \begin{bmatrix} -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & -1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Podemos entonces definir los vectores que unen los puntos del brazo del robot, quedando como se muestran a continuación. Por sencillez, vamos a tomar como referencia el brazo 1 ($\alpha = 0^\circ$), ya que la multiplicación de la matriz de rotación no afectará al aspecto de los vectores, y se podrán apreciar con mayor claridad.

$$\vec{OA} = \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\vec{AB} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(\theta_1) \\ 0 \\ -l_1 \text{sen}(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\vec{BC} = \begin{bmatrix} l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) \\ l_2 \cos(\theta_3) \\ -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{CO'} = R_z \begin{bmatrix} r_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Como se ha indicado en el apartado 3.3 queremos obtener el valor de los ángulos en función de la posición del elemento final. La posición del punto O es conocida siempre, ya que es la plataforma fija con la que anclamos el robot y, por consecuencia, también conocemos la posición del punto A. De un modo similar sucede con O', que será el punto objetivo que queremos alcanzar y, de forma análoga, también conoceremos la posición del punto C, ya que la plataforma no gira sobre sí misma.

Por tanto, para obtener los valores de θ tomaremos los vectores de posición de los puntos del robot (Ec.14) para obtener una expresión de la posición del punto O' desde el punto O, y ésta la igualaremos a las coordenadas deseadas de dicho punto (Px,Py,Pz).

$$\vec{OA} + \vec{AB} + \vec{BC} - \vec{CO'} = \begin{bmatrix} r_1 + l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) - r_2 \\ l_2 \cos(\theta_3) \\ -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \sin(\theta_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{bmatrix} \quad (14)$$

La ecuación correspondiente al movimiento en el eje Y se puede resolver directamente:

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{Py}{l_2}\right) \quad (15)$$

De esta ecuación obtendremos dos posibles ángulos, y sabemos observando la figura 14 que θ_3 está comprendido entre 0° y 180° , lo que nos permite eliminar la ambigüedad y quedarnos siempre con la solución positiva del arco coseno. Para simplificar el cálculo vamos a realizar el cambio de variable de $\phi = \theta_1 + \theta_2$. Teniendo en cuenta que r_1, r_2, l_1, l_2 y θ_3 son todos conocidos en este punto, nos quedamos con dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$\begin{bmatrix} r_1 + l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\phi) \sin(\theta_3) - r_2 \\ -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\phi) \sin(\theta_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Px \\ Pz \end{bmatrix} \quad (16)$$

Si ahora despejamos en la primera ecuación ϕ y sustituimos en la segunda:

$$\phi = \arccos \left(\frac{(Px - r_1 + r_2) - l_1 \cos(\theta_1)}{l_2 \sin(\theta_3)} \right) \quad (17)$$

$$-l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin \left(\arccos \left(\frac{(Px - r_1 + r_2) - l_1 \cos(\theta_1)}{l_2 \sin(\theta_3)} \right) \right) \sin(\theta_3) = Pz \quad (18)$$

También de la figura 14 podemos ver cómo se mueve el ángulo θ_1 . Se ha decidido limitar este ángulo entre los valores -60° y 90° . El límite superior de -60° se ha escogido como margen para que los brazos no rocen con la plataforma superior, y el límite inferior de 90° es para evitar el choque entre el brazo y la plataforma.

Una vez conocemos todos los ángulos podemos repetir el proceso para los 3 brazos, y obtener así una solución para un punto final dado. Si estos resultados los introducimos en el programa realizado con Python, obtendremos una solución cerrada con los valores de los ángulos a los que deben posicionarse los servomotores. Algunos ejemplos son las figuras 15, 16, 17 y 18.

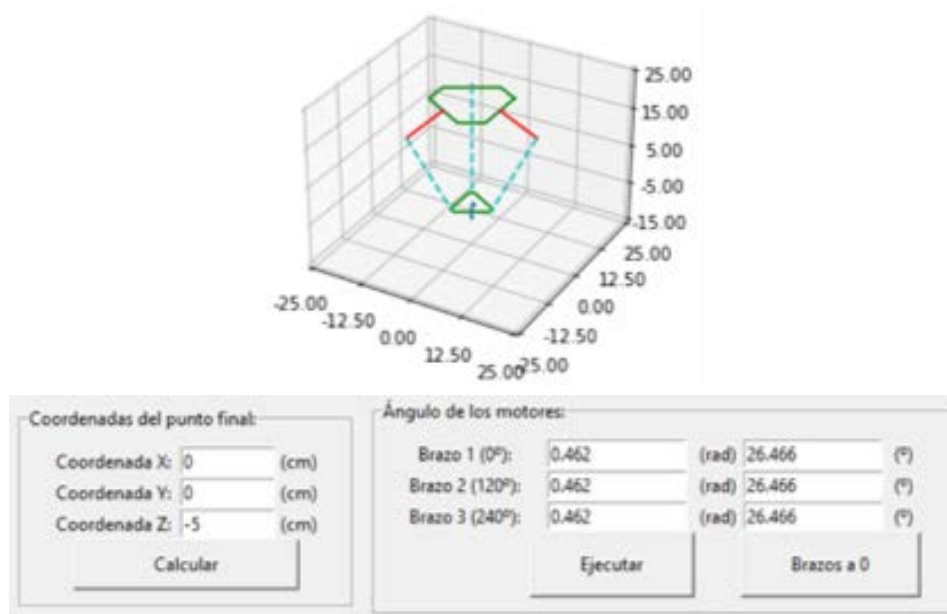


Figura 15: Ejemplo 1

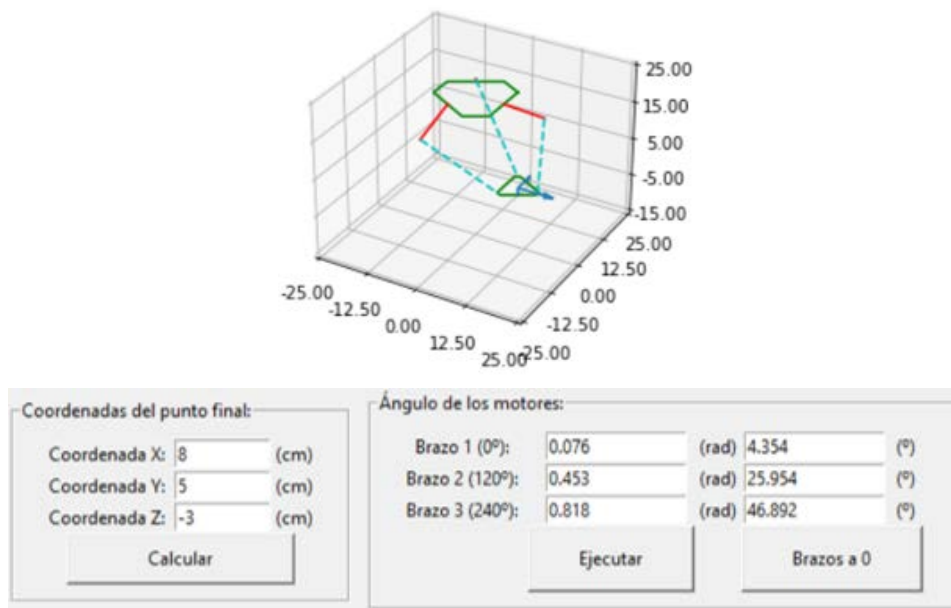


Figura 16: Ejemplo 2

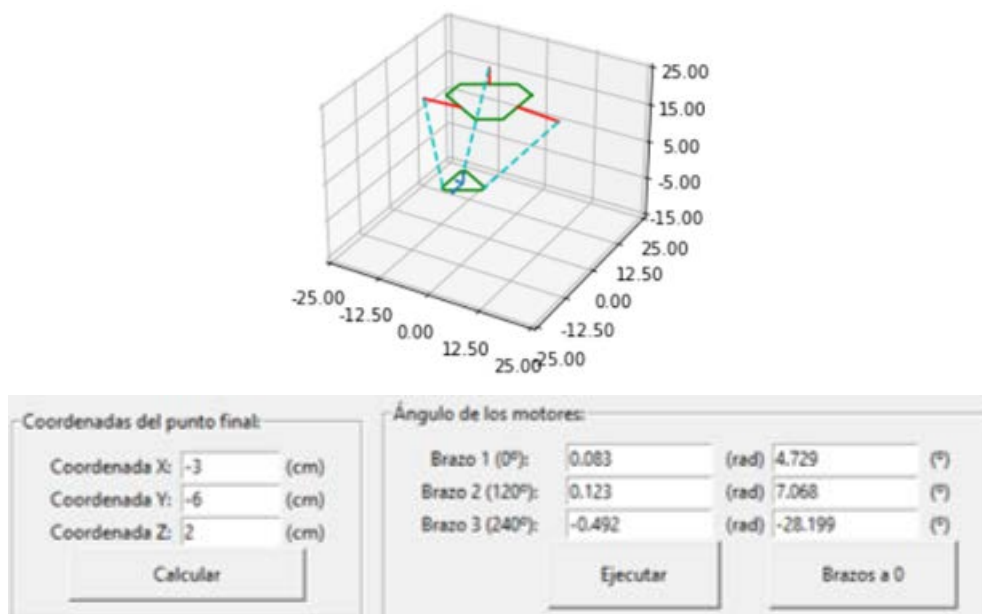


Figura 17: Ejemplo 3

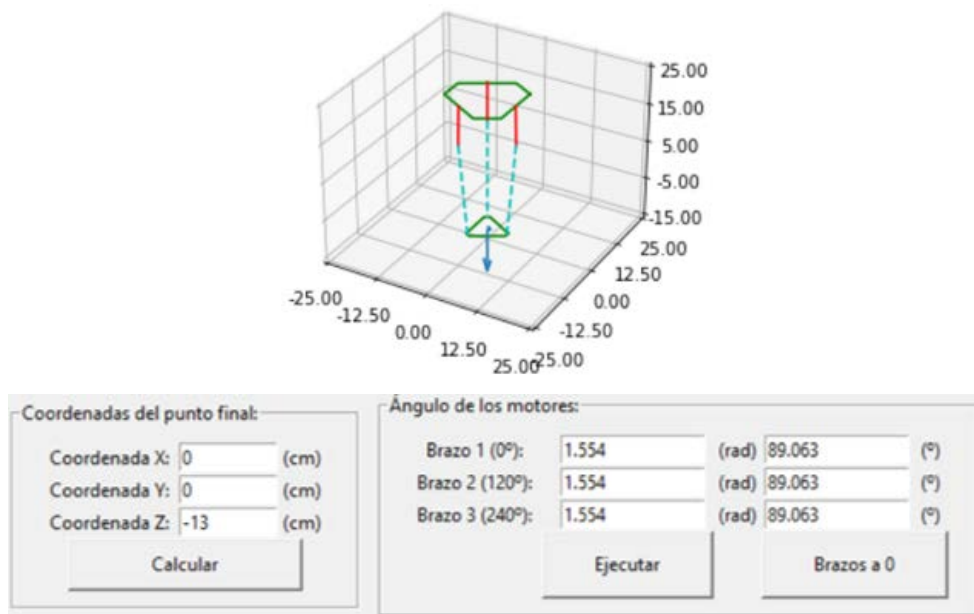


Figura 18: Ejemplo 4

Para consultar más información sobre cómo operar el programa, por favor referirse al anexo B.

4. FABRICACIÓN DEL ROBOT

4.1. Introducción

Como se ha indicado con anterioridad el robot Delta suele usar rótulas para conectar los brazos accionados por los motores con la plataforma inferior, y ya hemos decidido que para la realización de nuestro robot en plástico optaremos por utilizar únicamente pares de revolución.

Este capítulo mostraremos el diseño mecánico de cada una de las partes que compone el robot, incluyendo tanto las piezas diseñadas desde 0 mediante FreeCAD, como el resto de componentes que han sido necesarios para hacer a este robot funcional.

4.2. Componentes de control

Independientemente de la forma o tamaño final del robot, éste deberá tener un mínimo de componentes que se encarguen de la comunicación ordenador-robot y de generar el movimiento requerido.

4.2.1. Actuadores

Para realizar el movimiento nos hemos servido de un servomotor MG996R, comúnmente utilizados en proyectos de pequeña escala. Las características de este actuador son las siguientes [18]:

- Peso: 55 gramos.
- Dimensiones: 40,7 x 19,7 x 42,9 mm
- Torque detenido: 9,4 kgf·cm (4,8 V) - 11 kgf·cm (6 V)
- Velocidad: 0,17 s/60^o (4,8 V), 0,14 s/60^o (6 V)
- Alimentación: 4,8 V - 6 V
- Corriente de trabajo: 500 mA - 900 mA (6 V)
- Corriente detenido: 2,5 A
- Banda muerta: 5 ν s
- Doble cojinete
- Engranajes metálicos

- Temperatura de funcionamiento: 0 °C – 55 °C



Figura 19: Servomotor MG996R

El servomotor tiene un rango de movimiento de 180° . Su instalación se realizará de tal forma que cuando los brazos estén en posición horizontal ($\theta_1 = 0^\circ$) sea el equivalente a 90° en el servomotor. De esta forma si se requiere que el brazo se extienda, el motor puede girar desde 90 hasta 180° . Si necesitásemos que $\theta_1 < 0$, entonces haríamos uso del rango entre 0 y 90° . Por tanto, una rotación de $\theta_1 = -30^\circ$ sería igual a que el servomotor girase 60° .

El hecho de que el giro máximo del motor sea de $\theta_1 = 90^\circ$, nos libra de la posibilidad de que surja una singularidad, tal como se habló en el capítulo 2, ya que en ningún momento un brazo del robot se encontrará totalmente alineado, ya que siendo $r_2 < r_1$, eso significaría un $\theta_1 > 90^\circ$. Por el contrario, perdemos rango de movimiento en las posiciones más bajas del robot. Una forma de poder conseguir alcanzar esas posiciones sería montando los motores en una posición inclinada respecto a la base, pero complicaría en gran medida el diseño de la pieza del soporte del servomotor, por lo que se decidió trabajar con esa limitación de $\theta_1 = 90^\circ$.

4.2.2. Placa de control

Arduino es una plataforma de código abierto centrada en la realización de proyectos electrónicos [19]. Comprende tanto software como hardware, sin ser necesario adquirir una placa directamente de Arduino para hacer un proyecto, sino que existen una extensa oferta de placas compatibles de muchas marcas diferentes. Esto es especialmente importante cuando se compara con otras opciones como son micro-controladores o micro-ordenadores, como es el caso de la también conocida Raspberry Pi

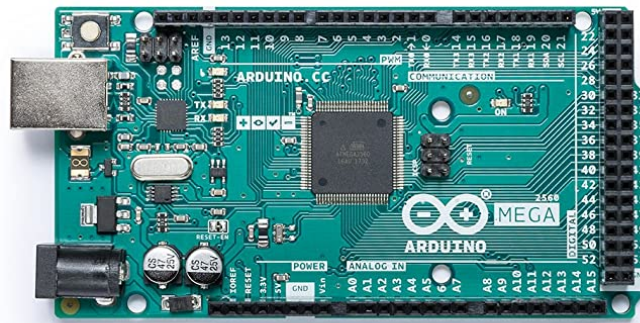


Figura 20: Placa Arduino MEGA

A nivel de software encontramos el programa Arduino IDE, y alrededor de éste una comunidad de personas que aportan sus conocimientos y construyen nuevos módulos para poder ser usados libremente por cualquier persona. Un ejemplo de su simplicidad de uso es este trabajo ya que se decidió utilizar como software de control de código abierto Python, y Arduino IDE ya venía con los módulos preparados para poder conectarse a la interfaz de Python, y gracias a la comunidad de Python encontramos librerías como PyFirmata que nos permiten integrar la placa de Arduino como si fuese una parte más del código.

Cuando se comenzó este proyecto existían dos alternativas a la hora de usar una placa Arduino: Arduino MEGA y Arduino UNO R3 (observar Fig.20 y Fig.21 respectivamente). Ambas opciones tienen prácticamente las mismas características, si existen algunas diferencias :

- Arduino MEGA:
 - Memoria EEPROM de 4kB.
 - Memoria Flash 256kB (8kB bootloader).
 - 16 pines de entrada analógica.
 - 15 pines de salida PWM.

- Arduino R3:
 - Memoria EEPROM de 1kB.
 - Memoria Flash 32kB (0.5kB bootloader).
 - 6 pines de entrada analógica.
 - 6 pines de salida PWM.



Figura 21: Placa Arduino UNO R3

En nuestro caso queremos controlar 3 servomotores, y cada uno lleva consigo una señal de PWM que debemos controlar. Del mismo modo, la placa de Arduino va a llevar cargada el software para la comunicación con el programa en Python, y será con éste donde realizaremos todos los cálculos dejando a la placa con el software básico de control. Por tanto las dos placas nos poseen capacidad más que suficiente como para realizar el trabajo.

Se escogió entonces la placa Arduino UNO R3, ya que es de menor tamaño y era más accesible en el momento de realizar la elección. No existe ningún problema en haber utilizado una placa en vez de otra, ya que los puertos de conexión relevantes para esta aplicación son comunes, con lo que ambas son perfectamente intercambiables.

4.2.3. Alimentación

En cuanto a la alimentación del robot debemos tener una serie de factores en cuenta: cada servomotor necesita alimentación, y será necesario cortocircuitar la tierra de la fuente de alimentación a la tierra de la placa de Arduino para evitar que los servomotores reciban señales “falsas”. Para simplificar el cableado, se han soldado y agrupado los cables por grupos, y se han forrado todos juntos para que ocupen el menor espacio posible y mantener el mayor nivel de orden posible. Dicho conjunto bajará por una de las patas del soporte del robot hasta el suelo, donde se conectará a la placa de Arduino y a la fuente de alimentación.

Cabe destacar que los cables de control de los servomotores (que van conectados desde el pin de la placa correspondiente a la entrada de señal del servomotor) se han agrupado junto a los de corriente, para así evitar tener diversas líneas de cables. A su vez la placa de Arduino vendrá alimentada por la conexión con el ordenador mediante su puerto USB 2.0 tipo B.

En el extremo del suelo (ignorando los cables que deben ir a la placa de Arduino) tendremos entonces los dos cables correspondientes a la alimentación de los servomotores. Desde ahí se pueden conectar a una fuente de alimentación o usar un adaptador con

extremo en forma de USB tipo A y usar otro tipo de cargadores (un ejemplo común sería un cargador de teléfono, comprobando de antemano que nos proporciona la suficiente potencia).

4.3. Diseño de las piezas

Como se puede apreciar en la figura 12 hay que diseñar dos articulaciones diferentes. La primera es la que se encuentra entre el brazo afectado por el motor y el paralelogramo formado por las barras, y la segunda es la que permite la deformación de dicho paralelogramo.

En la figura 22 podemos observar el robot Delta completo, con algunas de sus piezas asociadas a un número. En la siguiente lista enumeraremos dichas piezas para dejar claro la terminología que vamos a utilizar:

- 1: Base superior.
- 2: Soporte servomotor.
- 3: Brazo superior.
- 4: Articulación secundaria.
- 5: Barra.
- 6: Base inferior.

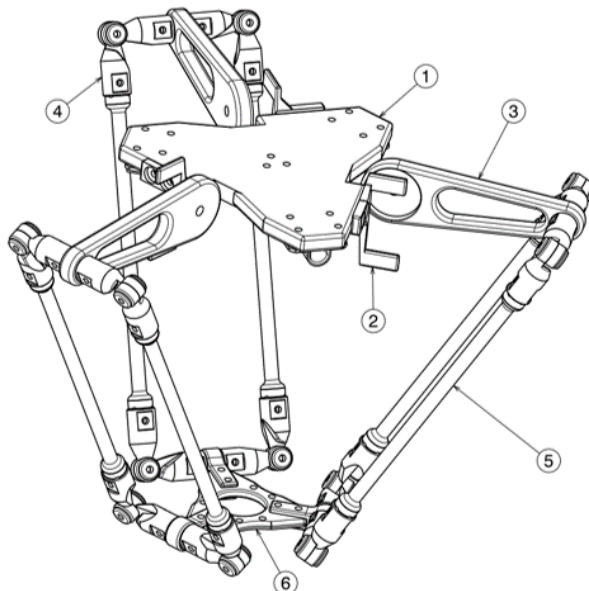


Figura 22: Robot Delta detallado

4.3.1. Articulación primaria

En esta articulación no sólo hay que asegurarse de permitir la rotación, sino que también se debe impedir la desalineación del paralelogramo respecto del resto del brazo. Debemos asegurarnos de que el enlace entre ambas partes se encuentra en la parte media del paralelogramo, para que sea coherente con el programa de control que se ha diseñado. Se crearon inicialmente tres diseños, presentes a continuación:

- Diseño 1 (Fig.23): La barra superior del paralelogramo presentaría un disco de mayor diámetro, y la articulación contendría éste ayudándose de una pieza auxiliar para asegurarse del cierre y pudiendo también realizar un desmontaje sencillo. Las dos partes del contenedor tienen perforaciones para permitir la unión mediante tornillos, y se haría uso de otras geometrías para ayudar a asegurar el alineamiento. El área de rozamiento sería en el interior de esta articulación.

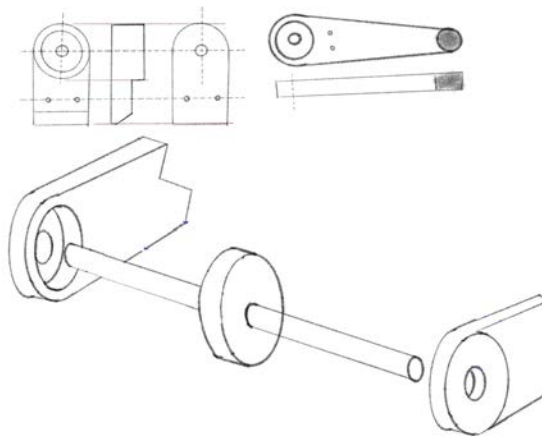


Figura 23: Idea de diseño 1

- Diseño 2 (Fig.24): Es un diseño más sencillo que el anterior, en el que es la barra la que posee el parador que rodea al brazo principal, y una perforación para añadir otra pieza idéntica como parador en el otro extremo.

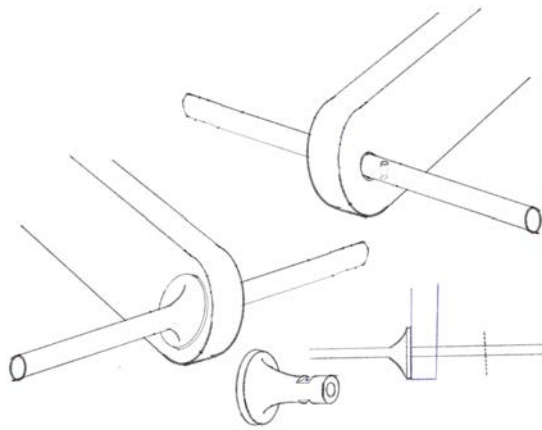


Figura 24: Idea de diseño 2

- Diseño 3 (Fig.25): Por último se pensó en esta opción, que es una variación del diseño 1 en el que se varía la forma de sujetar el disco central de la barra. En este caso se opta por dos piezas, cada una mitad de un cilindro, que se acoplarían de forma perpendicular respecto del primer diseño.

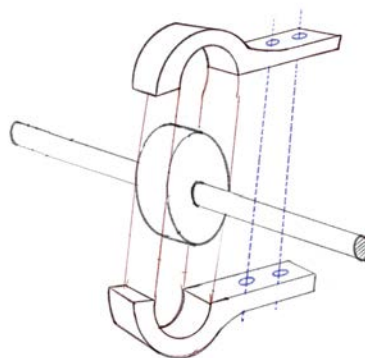


Figura 25: Idea de diseño 3

Valorando las 3 opciones al final se decidió utilizar el diseño 2, debido a ser el más sencillo y el que menos material requeriría usar para su impresión. Por tanto, sujetaríamos la barra superior del paralelogramo con unos topes. Tras ver el resultado apreciamos que la presencia de los topes era redundante (Fig.26), ya que las articulaciones podían desempeñar ese papel directamente, así que se acortó el tamaño de la barra y se adaptó para realizar un ajuste correcto (Fig.27).

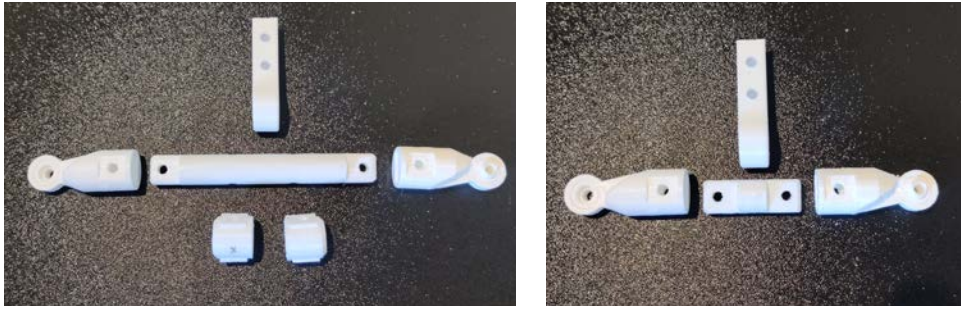


Figura 26: Comparación entre sistema de tope



Figura 27: Brazo superior

4.3.2. Articulación secundaria

Esta segunda articulación formará parte del paralelogramo en la parte inferior del brazo. La idea básica es crear una pieza que permita el giro entre el brazo principal y las barras (figuras 28 y 29), sujeto por un casquillo interior que a su vez tendrá un tornillo que asegurará dicha unión (figuras 30 y 31). Como primera idea se pensó que un lado de la articulación rodease a la otra.

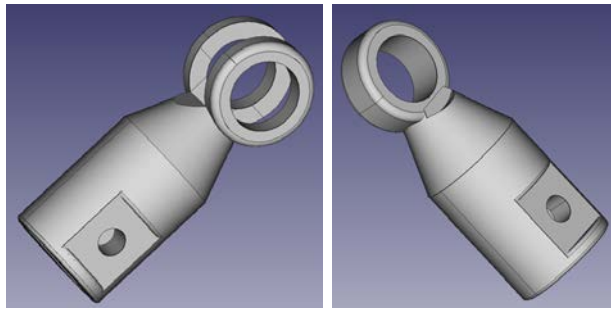


Figura 28: Articulación secundaria, versión 1



Figura 29: Articulación secundaria, versión 1 impresa

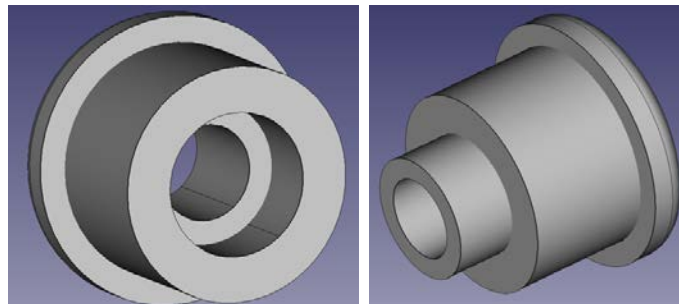


Figura 30: Casquillo de sujeción interior



Figura 31: Casquillo de sujeción interior, versión impresa

Tras realizar el montaje de la articulación se observó que el casquillo proporcionaba suficiente seguridad a la articulación, y no era estrictamente necesario que un lado rodease al otro. Por eso, a finalidad de simplificar el diseño, se modificó esta pieza de tal modo que con un mismo modelo se pudiese imprimir ambos lados de la articulación, y sería el casquillo el que mantendría el ensamblaje unido. Aunque este sería el sistema más apropiado, en la segunda iteración se modificó la geometría para poder aportarle mayor rango de giro (Fig.32).

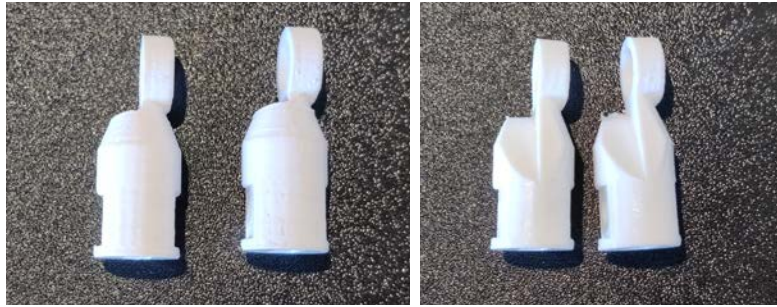


Figura 32: Articulación secundaria, modelo 2, sin y con geometría modificada

La mejora en el giro se puede apreciar en la figura 33, donde están en orden de izquierda a derecha: modelo 1, modelo 2 sin modificar y modelo 2 modificado. El ángulo mínimo que alcanzamos en el último caso es de aproximadamente 39° .



Figura 33: Comparación entre modelos de articulaciones secundarias

4.3.3. Plataforma inferior

La plataforma inferior será la encargada de soportar el elemento terminal. Como no se ha considerado la inclusión de un elemento específico, se ha dejado un orificio central de 3 cm de diámetro para colocar uno en un futuro. Éste se ha rodeado de 6 taladros para ayudar a la sujeción de dicho elemento. Tras imprimirse una primera versión, se observó que era necesario recortar unas esquinas para evitar posibles roces con el resto de piezas (Fig.34).



Figura 34: Base inferior

También se apreció que se podía reducir el espesor de esta pieza, que en un principio era de 1cm, pero que se podía disminuir a 0,5cm sin problema (Fig.35).



Figura 35: Comparación de los espesores de la base inferior

Para poder unirse a los brazos se diseñó una pequeña pieza de unión (Fig.36) que se atornilla a la base y contiene al par de Revolución. Se podría haber diseñado una pieza que contuviese la base y esta unión, pero se decidió optar por crear piezas diferentes para poder realizar una impresión más sencilla de éstas. De esta forma si fuese necesario intercambiar la plataforma inferior por otra que se ajuste mejor a unas necesidades concretas, bastará con desatornillar los 6 tornillos de la base y realizar el cambio. La distancia r_2 es la presente desde el centro de la base hasta el eje de la articulación.

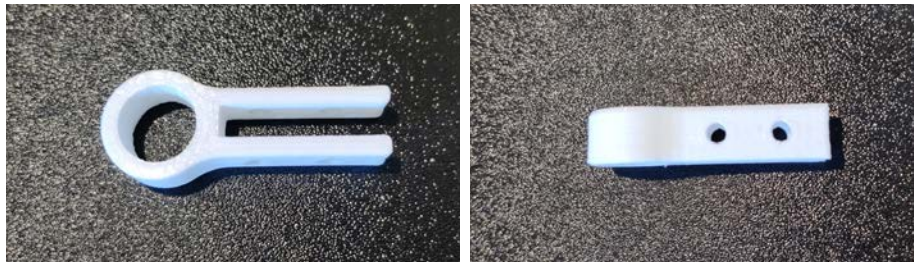


Figura 36: Pieza de unión

Esta pieza auxiliar se ha diseñado de tal forma para que la distancia que aporta desde el borde de la base hasta el eje sea de 1 cm. Utilizando el mismo sistema que con la articulación principal, se probó un ensamblaje (Fig.37) para una distancia r_2 de 6 cm, 5 cm de la base y 1 cm de la pieza de unión.



Figura 37: Ensamblaje de la base inferior

Con la finalidad de reducir el tamaño, se realizó una última modificación de la segunda versión, desplazando los taladros auxiliares 60° , quedando la pieza de la figura 38.

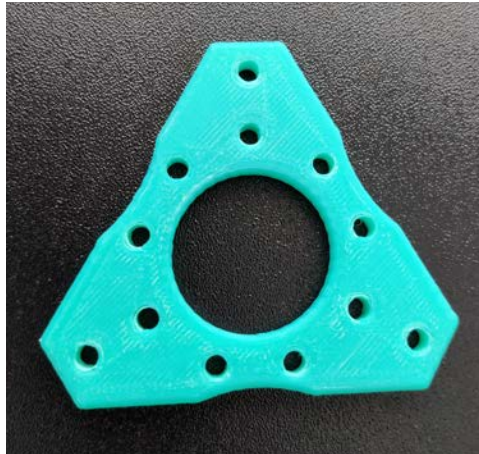


Figura 38: Modelo de base inferior reducido

La dimensión final r_2 es de 5 cm, 4 cm de base más 1 cm por la pieza de unión.

4.3.4. Barras

Por cada brazo están presentes dos barras paralelas, que forman junto con el resto del robot un paralelogramo que ayuda a mantener la base inferior horizontal. Estas barras se han diseñado para que puedan acoplarse a las articulaciones secundarias del mismo modo que se ensambla la articulación primaria. A la hora del diseño de esta pieza hay que tener en cuenta las dimensiones. El brazo del robot ha sido diseñado para tener una longitud concreta es entre los ejes de revolución de las articulaciones secundarias. La longitud de dicho brazo comprende a la barra y dos articulaciones secundarias, por lo que la longitud de la barra debe ser tal que asegure que la distancia sea la correcta. Para comprobar que estos cálculos se habían realizado correctamente, se imprimió un par de barras de prueba (Fig.39).



Figura 39: Barra de prueba

Sin embargo, ante un descuido al rebajar las imperfecciones tras la impresión en un extremo la superficie quedó más rugosa y demasiado ajustada, y cuando se quiso desmontar se rompió por un dicho extremo (Fig. 40).

Para intentar mitigar esto se realizaron unos surcos extra en la zona de la barra en contacto con la articulación. La función de dichos surcos es aumentar la densidad



Figura 40: Rotura de barra de prueba

en la zona de la zona de unión. Esto se fundamenta en que cuando nosotros creamos un diseño de una pieza en 3D, lo que creamos es una “carcasa” hueca, que más tarde tratamos con un software para impresoras 3D. En dicho software nosotros tomamos la carcasa y le damos un número de capas superiores, inferiores y de pared, a la vez que un porcentaje de relleno general a la pieza. Sería posible aumentar la rigidez aumentando la densidad del relleno de la barra, pero debido a que el fallo es local en la zona donde existe la unión con la articulación, sería contraproducente aumentar la densidad ya que sólo estaríamos añadiendo peso al resto de la barra y aumentando considerablemente el tiempo de impresión. Lo que se ha optado por realizar son unos surcos (Fig.41), para que la impresora considere el contorno de éstos como paredes, y por tanto las rodeará de tantas líneas sólidas como se haya indicado. De esta manera aumentamos la rigidez de esa zona local sin aumentar el relleno en el resto de la pieza.

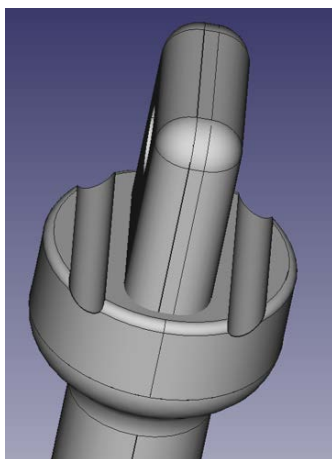


Figura 41: Surcos en la superficie de la barra

A la vez que la realización de los surcos se redujo el diámetro de la barra, ya que se observó que el diámetro de la barra de prueba era excesivo para su tamaño (Fig.42).



Figura 42: Barra final

La distancia final l_2 es de 25 cm. Cabe destacar que l_2 no es la longitud de la barra, sino la longitud entre los pares cinemáticos a los extremos.

4.3.5. Base superior y sujeción de motores

La base superior será la encargada de soportar el robot y sujetar los actuadores de los brazos. El diseño se comenzó pensando alrededor de cómo sujetar los servomotores MG966R, dejando dos taladros para atornillar a la base, y dos “alas” con la idea de ser perforadas cuando se ajuste el motor (Fig.43).

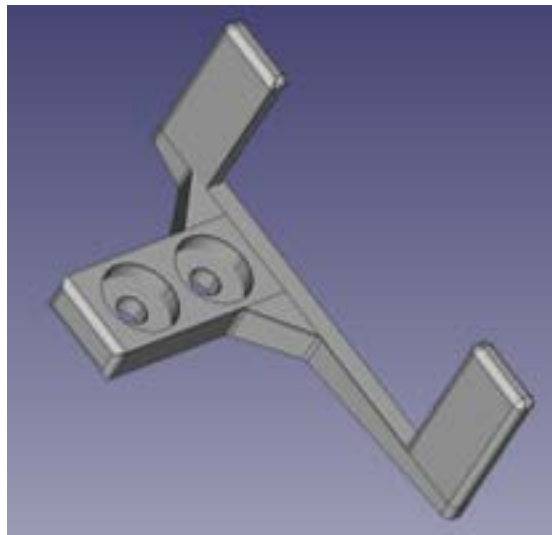


Figura 43: Soporte servomotor

El último paso era crear la plataforma de soporte para el robot. Su forma básica es similar a la de la base inferior, pero recortada de tal forma que se puedan atornillar los motores y se deje suficiente margen de maniobra al brazo cuando se mueva. También se incluyeron perforaciones en el centro y los extremos para ayudar a ensamblar el conjunto a un soporte, del que se hablará con más detalle en el apartado 4.4. La distancia r_1 desde el centro de la base hasta el eje del motor es al final de 7cm (Fig.44).

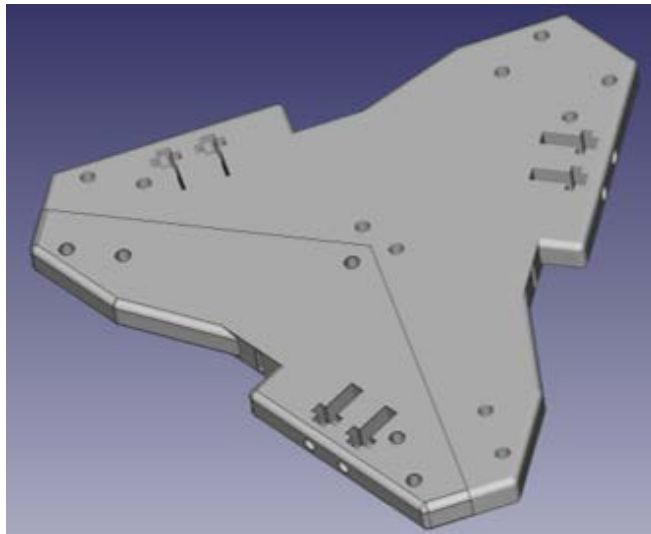


Figura 44: Plataforma superior

Tras esto lo único que queda por hacer es el realizar el ensamblaje de todo el robot y proceder a comprobar los movimientos del mismo.

4.3.6. Elementos auxiliares

Para poder realizar las pruebas de repetibilidad se diseñó una punta que se pudiese acoplar a la base inferior, con el único fin de permitir observar con mayor exactitud el centro de la base (Fig.45). Se alinea haciendo uso de los taladros auxiliares de la base, sin atornillarse, permitiendo ser puesta o retirada con facilidad.



Figura 45: Punta para pruebas

4.4. Montaje

Una vez tenemos todas las piezas se realizó el montaje del robot. Se comenzó con el ensablaje de los motores a los brazos y realizar pruebas parciales para comprobar si respondían correctamente a las órdenes del programa. También se hizo una primera prueba dejando el conjunto sobre una superficie plana para ver si era capaz de levantarse a si mismo sin problema (Fig.46).

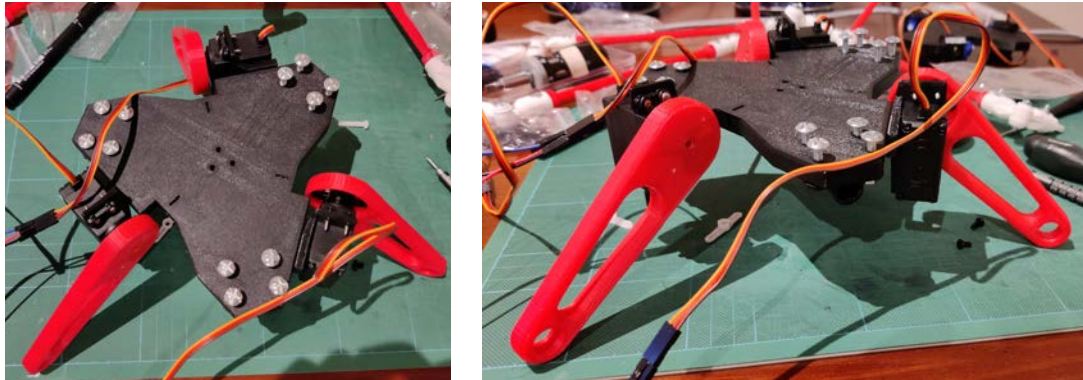


Figura 46: Ensamblaje brazos - base

Tras esto se procedió a ensamblar los 3 brazos y sujetar el conjunto mediante un soporte, realizado a partir de 3 tubos de aluminio, unidos a la base por los 3 extremos salientes. Para ayudar al nivelado de la parte superior, y por si se cambiase el elemento terminal y fuese necesario aumentar la altura a la que debe estar el robot, el soporte se ha diseñado de tal forma que el soporte tenga patas telescópicas, con un tubo exterior de aluminio de 10mm de diámetro y otro interior de 8mm. El mecanismo que asegurará la altura de cada una de las patas también se ha diseñado mediante impresión 3D, con un hueco para introducir una tuerca y el agujero correspondiente para que un tornillo asegure la posición (Fig.47).



Figura 47: Sistema telescópico de una pata del soporte

Una vez todo ensamblado, el aspecto final del robot es el de la figura 48.

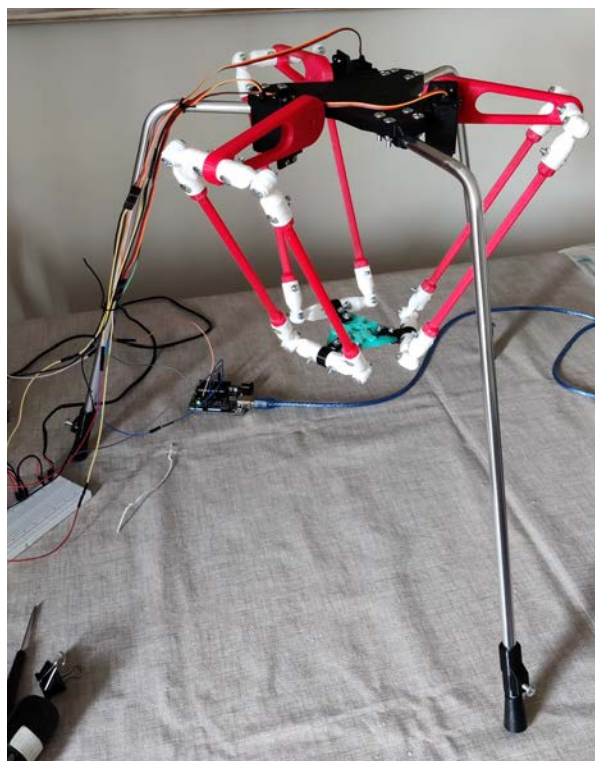


Figura 48: Robot ensamblado

El movimiento se obtiene alimentando los servomotores a una corriente de 5V, tensión de funcionamiento tal como está indicada en sus parámetros en el apartado 4.2.1. Como se puede ver en la figura 48, para facilitar al alumno la distinción de los diferentes elementos

del robot en el diseño final se ha optado por usar diferentes colores para distintas piezas. El criterio seguido es el siguiente:

- Negro: Partes inmóviles o auxiliares, tales como la plataforma superior o piezas de unión.
- Blanco: Pares cinemáticos de revolución. Aunque no se aprecie en la figura 48, las barras internas situadas en el brazo superior (como se veía en la figura 26) también están impresas en plástico blanco.
- Rojo: Partes móviles, los eslabones que unen diferentes puntos del robot.
- Verde: Elemento terminal, la base inferior y la punta para pruebas que hará la función del punto central de la herramienta del robot (TCP).

5. RESULTADOS

5.1. Introducción

Previa a la impresión de las piezas finales, cuando se valoraban las dimensiones que debería tener el robot, se buscaba una solución que no resultara en un diseño demasiado grande, pero a la vez que se pudiese apreciar con facilidad los movimientos y resultase un buen ejemplo didáctico.

Como se explicó en el capítulo 3.3, no es posible obtener una solución de la cinemática directa en el caso del robot Delta, por lo que no podemos calcular el espacio de trabajo del robot a partir de los recorridos de los servomotores y las dimensiones de las piezas del robot. Por ello, mediante la implementación en Python de las expresiones que se muestran en la sección 3.4, se realizaron simulaciones para observar el rango de movimiento que poseería el robot en función de los distintas dimensiones que se le asignara a sus piezas. Encontramos un buen compromiso entre tamaño y visibilidad, que resultaron en los valores que se indicaron en el capítulo 4 y quedan representados en la tabla 1.

Parámetro	Dimensión (cm)
r_1	7
r_2	5
l_1	10
l_2	25

Tabla 1: Valores finales de los parámetros dimensionales

Las correspondientes simulaciones se pueden observar a continuación. En todo momento el punto representado es el punto O' de la base inferior, considerando el valor vertical nulo el que tiene dicha plataforma cuando los 3 brazos están en posición horizontal ($\theta_1 = 0^\circ$), para el cual la distancia vertical entre los puntos O y O' es de 21.93cm. Se decidió simular las posiciones extremo que es capaz de alcanzar el robot, si tan solo se moviese en un eje o si se moviese en ambos a la vez. En todos los ejes los desplazamientos se realizaron con una resolución de 1cm.

Este procedimiento nos proporciona 8 puntos por cada altura que simulemos. En la figura 49 simplemente se han representado los puntos que indican las posiciones finales del robot, y se puede observar que en los puntos más bajos, al estar los brazos del robot extendidos, tendremos menos capacidad de movimiento lateral. En la figura 50 se ha representado el octógono formado por esos 8 puntos de cada "capa", para intentar dar una mejor idea del espacio de trabajo aproximado dentro del que puede trabajar el robot.

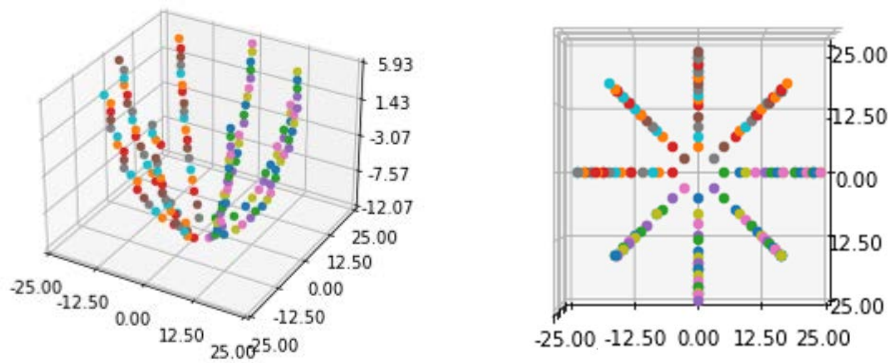


Figura 49: Simulación considerando el punto final

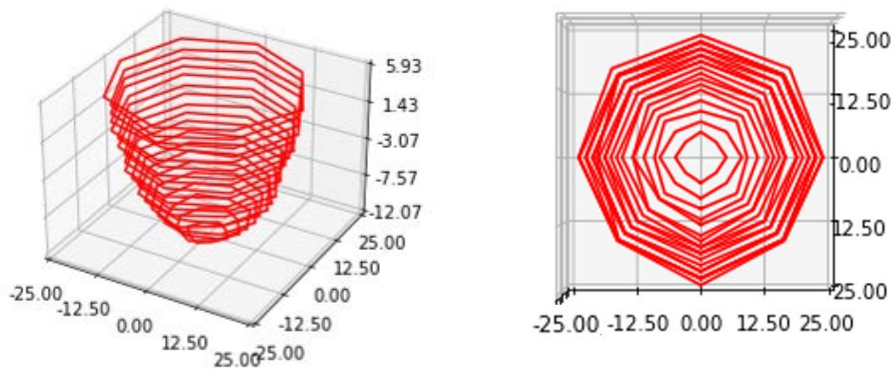


Figura 50: Simulación del rango máximo por capas

Cabe destacar que debido a la limitación superior de -60° impuesta a los motores (tal como se comentó al final del capítulo 3.4) existen algunos puntos dentro del volumen de trabajo anteriormente indicado que no son alcanzables. Nos referimos a puntos, por ejemplo, cerca del margen superior del movimiento donde los ángulos de los servomotores se acercan a dicho límite de -60° cuando está en la posición alineada al eje, que al realizar un ligero desplazamiento lateral uno de los brazos supera dicho umbral y entonces limitamos la realización de dicho movimiento. Esto, sin embargo, sólo ocurre en una pequeña franja alrededor del centro, ya que pasada esa distancia, dichos ángulos volverán a bajar hasta llegar al límite físico debido a las dimensiones del robot, presente en la figura 50.

En cuanto al límite inferior de movimiento se alcanzará en la coordenada $z=-13\text{mm}$, en la cual los tres brazos estarán a un ángulo $\theta_1 = 89,063$. Será un único punto, ya que cualquier intento de realizar un desplazamiento lateral provocará que alguno de los 3 brazos se desplazase a una distancia superior a 90° , que no es posible mediante la configuración actual del robot.

Esto no resulta un problema a la hora de controlar el robot, ya que el usuario recibirá un aviso de cuando está intentando introducir una posición no válida como destino. Para más detalles se explicará el programa en el Anexo B.

5.2. Ensayos de repetibilidad

Para comprobar la repetibilidad del robot se realizó una serie de ensayos tomando una selección de puntos iniciales y escogiendo un punto final concreto, comprobar si el robot era capaz de alcanzar dicha posición final desde todos los puntos iniciales sin que esto supusiese un desfase apreciable.

Para realizar el ensayo se colocó una hoja cuadriculada sobre la que, tras mover el robot a la posición final, se marca el punto objetivo (Fig. 51). Tras esto se desplaza el robot a diferentes puntos y se le solicita volver al punto objetivo, marcamos de nuevo la posición y repetimos.

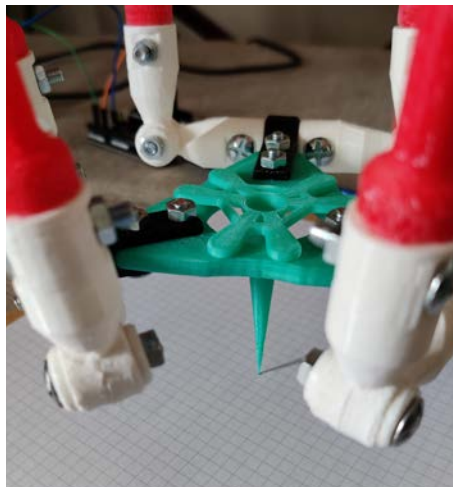


Figura 51: Disposición del ensayo de repetibilidad

El ensayo se realizó en cinco ocasiones, considerando 20 puntos en cada uno. Aquí presentamos el primero de los ensayos (debido a la gran extensión de las tablas, para consultar el resto de datos referirse al anexo C). La coordenada objetivo de este ensayo es (4,3,-10).

Origen (X,Y,Z)	Desfase (mm)	
Pto. Origen(0, 0,-5)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(0,0 ,2)	X	0
	Y	3
Pto. Origen(5,5,-8)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(7,3,-4)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(12,10,0)	X	1
	Y	-3
Pto. Origen(16,8,2)	X	-1
	Y	0
Pto. Origen(4,-4,-8)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(2,-6,-4)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(8,-4,0)	X	-1
	Y	-3
Pto. Origen(10,-14 ,2)	X	-1
	Y	3
Pto. Origen(-5, 5, -8)	X	-5
	Y	-1
Pto. Origen(-1,5,-4)	X	-1
	Y	1
Pto. Origen(-7,3,0)	X	-1
	Y	0
Pto. Origen(-9,12 ,2)	X	-2
	Y	-3
Pto. Origen(-3, -3, -8)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(-4,-2, -4)	X	0
	Y	-2
Pto. Origen(-6,-8,0)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(-12,-9,2)	X	1
	Y	1
Pto. Origen(4,-5,5)	X	1
	Y	0
Pto. Origen(-8,7,5)	X	0
	Y	-2

Tabla 2: Resultados del ensayo

Una representación gráfica de lo anterior es la presente en la figura 52:

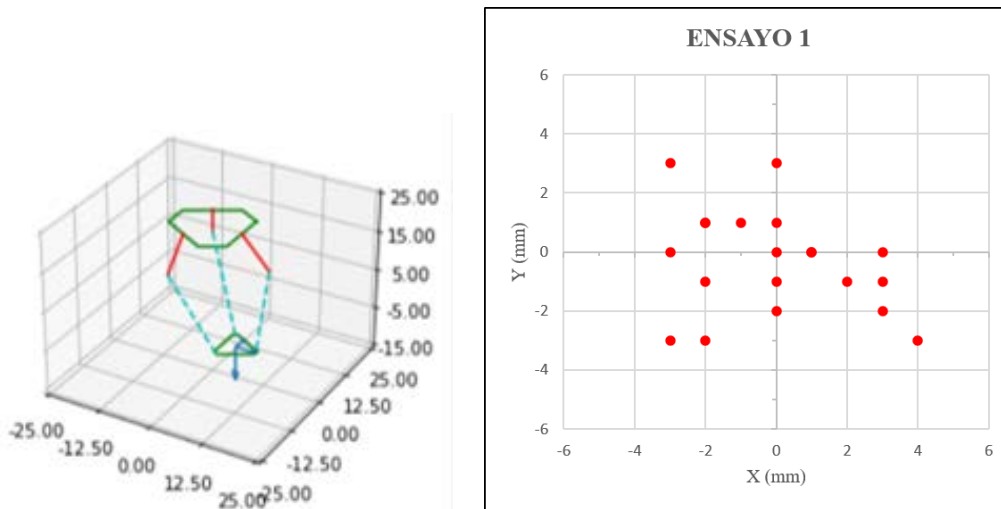


Figura 52: Representación del ensayo

Una vez obtenidos los datos de los ensayos, decidimos calcular la media y la varianza. Hay que recordar que para considerar que el robot es exacto y preciso debe cumplir [20]:

- El robot será exacto si la media es cercana a 0.
- El robot será preciso si la varianza es pequeña.

Haciendo estos cálculos para los datos de la tabla 2 obtenemos la tabla 3

Media	X	-0,600
	Y	-0,350
Varianza	X	1,726
	Y	3,082

Tabla 3: Media y varianza para los datos del ensayo

Podemos observar entonces que el robot es muy exacto, aunque no tan preciso. Esto es debido a las tolerancias de los componentes del robot. Por un lado existe una tolerancia variable inherente de la impresión 3-D debido a la contracción del plástico al enfriarse tras ser depositado sobre la cama de la impresora, la cual es difícil de calcular para tenerla en cuenta de antemano. Por otro lado existe una ligera holgura en el eje del servomotor debido a su calidad de fabricación ante la cual no es posible realizar ninguna acción. Cabe destacar que los desfases observados en la tabla 2 se presentan en milímetros, mientras que en todo momento los movimientos y coordenadas se encuentran en centímetros. Consideramos que aunque existe un pequeño fallo de precisión, éste es aceptable cuando se tiene en cuenta que su finalidad es lectiva.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1. Conclusiones

Tras la finalización del presente Trabajo Fin de Máster se han podido alcanzar las siguientes conclusiones:

- Ha sido posible diseñar una topología alternativa del robot Delta, cambiando la rótula por un par de pares cinemáticos. De este modo es posible proceder a su fabricación mediante impresión 3-D.
- Se ha programado el software de control del robot haciendo uso de Python, incluyendo una interfaz gráfica para facilitar la comunicación con el robot. Además de los valores de las articulaciones de los servomotores obtenemos una representación gráfica básica sobre la posición del robot. El software ha quedado preparado para la inclusión de un cuarto actuador que permita controlar una herramienta acoplada al elemento terminal.
- Se han realizado simulaciones para determinar el espacio de trabajo del robot y determinar así las dimensiones que deberían tener las piezas.
- Se ha realizado el diseño de todas las piezas del robot mediante un software de modelado 3-D, obteniéndose los ficheros necesarios para su posterior fabricación mediante impresión 3-D. Gracias a esto será posible obtener recambios de las piezas con gran rapidez.
- Se ha ensamblado todo el conjunto alrededor de un soporte ajustable para facilitar la calibración antes de su uso.
- Se ha realizado una serie de ensayos para determinar la precisión de exactitud y precisión del robot, obteniendo resultados aceptables para desempeñar su función como herramienta educativa.

En general, ha sido posible realizar el diseño y construcción de un prototipo de robot Delta en plástico haciendo uso de la impresión 3-D, y se espera que pueda servir de apoyo a futuros estudiantes de ingeniería interesados en el campo de la robótica y que deseen conocer más sobre los robots paralelos.

6.2. Líneas futuras

Ha sido posible alcanzar el objetivo que se indicaba en la introducción de este trabajo. Sin embargo, si se quisiese seguir trabajando sobre el robot se podría continuar en alguno de los siguientes aspectos:

- **Óptimización de masa:** Se podría realizar un estudio más extenso y ver si es posible reducir la cantidad de plástico utilizado por las piezas, reduciendo así el peso, tiempo de impresión y coste. Se debe asegurar que tras las modificaciones el robot no ha perdido funcionalidad.
- **Cálculo de trayectorias:** Actualmente es posible almacenar diversas coordenadas y ejecutarlas en orden, separadas por un pequeño intervalo. Sería posible trabajar sobre el software de control para que sea posible obtener trayectorias con un movimiento más suave.
- **Control de una herramienta:** El software está preparado para aceptar una señal más, que puede ser utilizada para controlar una herramienta que se acople a los taladros realizados en la plataforma inferior. Del mismo modo el cableado del robot está preparado con los cables de corriente y señal correspondientes.
- **Control remoto:** Si se deseara que no fuese estrictamente necesaria la conexión física entre ordenador-robot se podría incluir un módulo de Bluetooth a la placa de Arduino para permitir su conexión inalámbrica. Sería necesario también incluir el correspondiente código al software de Python.
- **Cinemática directa:** El software de control presente está programado para calcular la cinemática inversa. Si se desea profundizar en el estudio del robot se podría incluir un cálculo numérico de la cinemática directa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pandilov, Z.; Dukovski, V. *Comparison of the characteristics between serial and parallel robots* - ACTA TEHNICA CORVINIENSIS Fascicule 1 [January – March] Tome VII. 2014.
- [2] Wallén, J. (2008). *The history of the industrial robot* - Linköping.
- [3] Organización Internacional de Normalización. (2016). *Robotics* (ISO/TC 299). <https://www.iso.org/committee/5915511.html>
- [4] <http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr0708/archivos/15/Tema5,4.htm>
- [5] Barrientos, A.; Peñín, L.F.; Carlos Balaguer, C.; Aracil, R. (2012). *Fundamentos de robótica* - McGraw Hill 2da Ed
- [6] Legarreta, J.; Martínez, R. *Tema 2. Morfología del robot*. Proyecto OpenCourseWare - Universidad del País Vasco.
- [7] Duarte Barón, K.; Borrás Pinilla, C. (2016). *Generalidades de robots paralelos* - Vis. Electron, 10, 102-112.
- [8] Babeth P.; Saravia, D.; Jhair H. Lopez, M.; Riaza, H. Q. (2009). *Revisión del estado del arte de manipuladores paralelos* - Scientia et Technica Año XV, No 42, Agosto de 2009.
- [9] Karandikar Cortés, J. (2003). *Motion planning algorithms for general closed-chain mechanisms* - Institut National Polytechnique de Toulouse
- [10] Merlet, J. (2006). *Parallel robots vol. 2* - Springer.
- [11] Pedraz, M.F.; Cárdenas, P. F.; Rodríguez, F. J.; Yime, E. (2015). *Aproximación al diseño de robots paralelos, análisis de caso del robot delta* - IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización - CIIMA
- [12] Bonevs, I. (2001). *Delta parallel robot - The story of success*.
- [13] Página oficial de Igu: <https://www.igus.es/info/robot-delta-sistema-modular>. Última visita: 4-Mayo-2021
- [14] Página oficial de FANUC: <https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/delta-robots/dr-3ib-series/dr3ib-8l>. Última visita: 4-Mayo-2021
- [15] Página oficial de Omron: <https://industrial.omron.es/es/products/x-delta-3+1>. Última visita: 4-Mayo-2021
- [16] Fernández del Rincón, A; García Fernández, P. *Análisis y síntesis estructural (II)* - Proyecto OpenCourseWare - Universidad de Cantabria

- [17] Spong, M. W. *Robot Dynamics and Control* - John Wiley & Sons.
- [18] Recuperado de la base de datos *ALLDATASHEET*. www.alldatasheet.es/view.jsp?Searchword=MG996R. Última visita: 10-Mayo-2021
- [19] Recuperado de la página oficial de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>. Última visita: 10-Mayo-2021
- [20] Instituto Geológico y Minero de España. *Errores, medias y ajustes*.
- [21] Recuperado de la tienda oficial de Anet. anet3D.com/pages/a8. Última visita: 10-Mayo-2021
- [22] Recuperado de la tienda oficial de Creality. www.creality.com/goods-detail/ender-3-3D-printer. Última visita: 10-Mayo-2021

A. ANEXO A: Impresión 3D

A.1. Introducción

La base principal de este trabajo consiste en poder realizar una réplica de un robot Delta mediante impresión 3D. Aunque no nos hayamos centrado en explicar el proceso, sí que resulta interesante dejar patente las características de este proceso.

En cuanto al material se ha usado PLA (ácido poliláctico), un material termoplástico muy común en la impresión 3D. Otro plástico muy común es el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), que posee algunas otras ventajas como ser capaz de realizar una soldadura química para ensamblar diferentes piezas. Sin embargo, se ha escogido el PLA debido a su gran accesibilidad y las menores temperaturas con las que nos obliga a trabajar.

A.2. Equipo utilizado

Cuando nos referimos al equipo utilizado estamos hablando de las impresoras con las que se ha realizado la impresión de las piezas del robot. En un principio se decidió usar una Anet A8:



Figura 53: Anet A8

Cuyas características de impresión son [21]:

- Volumen de impresión: 220x220x240mm
- Precisión: Z:0,004mm, XY: 0,012mm
- Precisión de impresión; $\pm 0,1-0,2$ mm
- Velocidad de impresión: 40-120mm/s
- Espesor de capa: 0,1-0,4mm
- Diámetro recomendado de filamento: 1,75mm

- Materiales de impresión aceptados: PLA, ABS, HIPS, etc.

Sin embargo, ocurrió un problema cuando todavía se estaban imprimiendo las piezas que provocó que no se pudiese seguir utilizando esta máquina. Debido a esto, se cambió a utilizar una Creality Ender 3.



Figura 54: Creality Ender 3

Con características [22]:

- Volumen de impresión: 220x220x250mm
- Precisión de impresión; $\pm 0,1$ mm
- Velocidad de impresión: 30-180mm/s
- Espesor de capa: 0,1-0,4mm
- Diámetro recomendado de filamento: 1,75mm
- Materiales de impresión aceptados: PLA, ABS, TPU, madera, cobre, etc.

Las características de esta impresora son similares a la anterior, pero cambiar a un modelo más nuevo también nos abrió la oportunidad a una serie de mejoras. La primera y más obvia, es una mejoría en la calidad de impresión, principalmente en la suavidad de las superficies curvas. Otra mejoría menos aparente es la compatibilidad con versiones más modernas de software de creación de gcode. Esto nos permite cambiar el modo del que se realiza el relleno de las piezas, que por defecto suele ser con forma de rejilla que aporta mayor rigidez a una dirección determinada, a un modelo cúbico que proporciona más rigidez en todas las dimensiones.

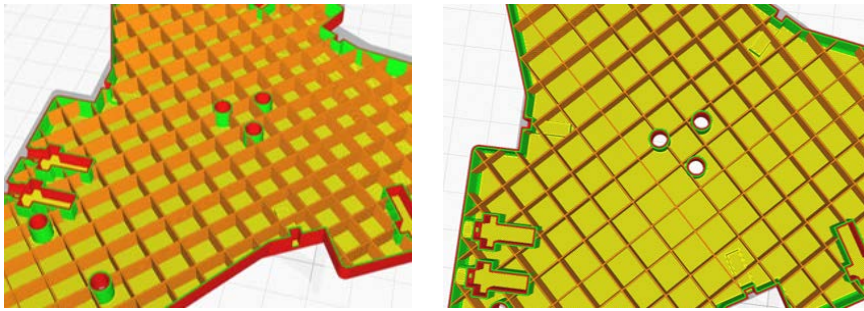


Figura 55: Sistema de relleno por rejilla

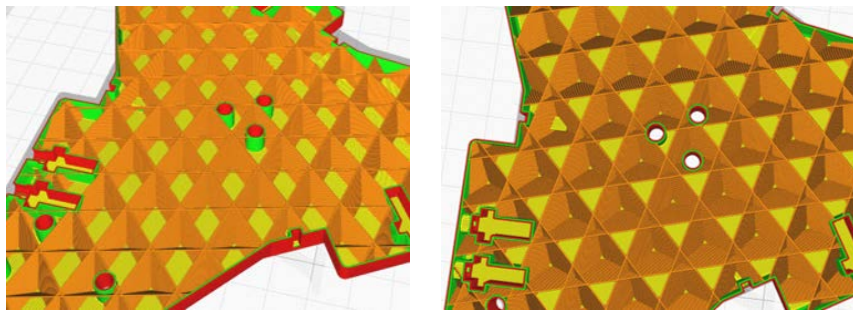


Figura 56: Sistema de relleno cúbico

A.3. Parámetros de impresión

En cuanto a los parámetros que se han utilizado para imprimir las piezas, vamos a indicar tanto el porcentaje de relleno que se ha escogido, como la cantidad de material que utiliza cada pieza. Algunas de las piezas que aparecen en la tabla siguiente están presentes más de una vez en el robot, por lo que también se mostrará el número de copias que sería necesario producir para formar el robot. El tiempo de impresión depende de un gran variedad de factores tales como: número de capas de pared/suelo/techo, velocidad de impresión, sistema de relleno, calidad de impresión, soportes si son necesarios, diámetro de la boquilla (aunque generalmente se mantiene por defecto de 0,4mm), elección de sistema de trayectorias del cabezal, o incluso el hardware de la propia impresora. Es posible obtener tiempos diferentes usando otras configuraciones, pero mostramos cuáles han sido las utilizadas en este trabajo:

- Número de capas de pared: 2
- Número de capas de suelo: 3
- Número de capas de techo: 3
- Velocidad de impresión: 50 mm/s

- Calidad estándar (0,2 mm)

En la tabla 4 se presenta la información básica de las piezas por si se desea reproducirlas, dejando las especificaciones de la impresora que se utilice a criterio de la persona que quiera realizar estas réplicas. Hay que tener en cuenta que el tiempo indicado es el calculado por el software, pero éste tiene un margen (que generalmente hace que tarde más tiempo) que depende de la pieza y la máquina. Del mismo modo, imprimiendo varias piezas juntas a la vez puede ahorrarnos tiempo si lo comparamos a la impresión individual de cada pieza.

Nombre	Relleno (%)	Peso (g)	Tiempo (min)	Copias	Soporte
Plataforma superior	15	49	331	1	No
Soporte servomotor	10	2	37	3	No
Brazo superior	15	9	88	3	No
Articulación secundaria (x1)*	10	6	45	24	Si
Casquillo hembra	10	1	8	12	No
Casquillo macho	10	1	9	12	No
Barra articulación	10	2	31	6	Si
Barra	15	8	72	6	Si
Base inferior	15	6	54	1	No
Pieza unión inferior	10	2	22	3	No
Unión soporte-base	10	3	31	3	Si
Junta telescópica soporte	10	4	43	3	Si
Punta para pruebas	10	3	42	1	No

Tabla 4: Parámetros piezas impresas

*articulación secundaria (x1) hace referencia a la mitad de la articulación. Con dos modelos idénticos se forma la articulación completa.

En total será necesario utilizar 346g de PLA y conlleva un tiempo de impresión total de 2992 min, o lo que es lo mismo, 49 horas y 52 min. Se entrará más en detalle sobre el coste que esto supondría en el Anexo D.

B. ANEXO B: Interfaz gráfica del programa

B.1. Introducción

En este anexo mostraremos el aspecto de la interfaz gráfica del programa diseñado en Python encargado de comunicarse con la placa de Arduino que gobierna los servomotores.

B.2. Interfaz

El programa se ha realizado usando el módulo de Tkinter de Python, por lo que la interfaz sigue el esquema básico de dicho módulo, aunque su aspecto es bastante similar al de otros programas realizados mediante otros sistemas.

Es necesario que la placa de Arduino del robot esté conectada al ordenador previamente al inicio del programa, ya que el primer paso es encontrar en que puerto serie se encuentra la placa. Si no está conectada el programa no podrá iniciarse. Del mismo modo, si durante el proceso la placa se desconecta, será necesario reiniciar el programa.

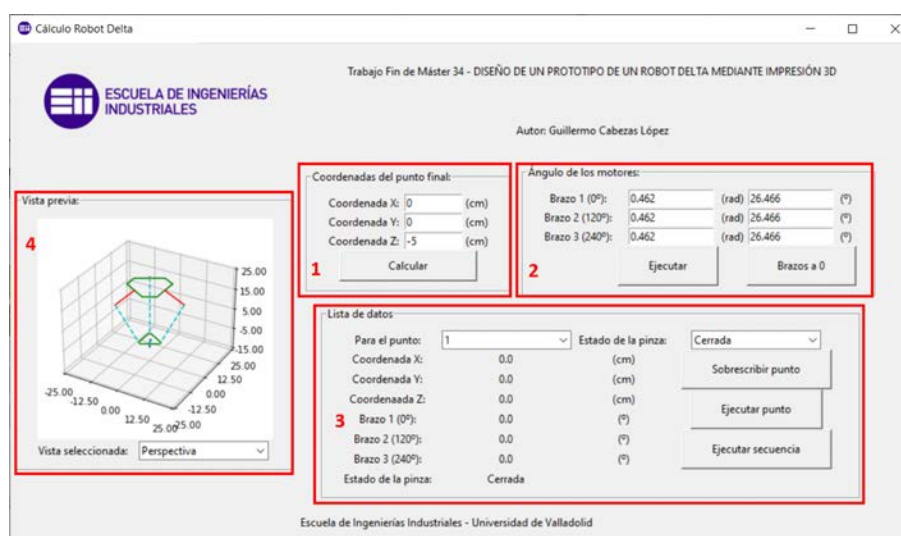


Figura 57: Interfaz gráfica del programa

Como se puede observar en la figura, el programa está dividido en 4 zonas principales:

- Zona 1: En esta zona están presentes los cuadros de entrada que nos permite introducir la coordenada que deseamos. Debajo de éstos se sitúa el botón que ejecuta el proceso de cálculo.
- Zona 2: Aquí es donde salen representados los resultados del cálculo, tanto en radianes como en grados. Esta solución se imprime dentro de cuadros de entrada, que nos

proporciona una función a mayores cuando queremos guardar posiciones en la lista de la zona 3. En esta misma zona se encuentra dos botones. El primero, “Ejecutar”, carga el punto calculado al robot para que realice el movimiento. El segundo, “Brazos a 0” coloca los 3 brazos en posición horizontal, que se ha considerado la posición por defecto del robot.

- Zona 3: En este apartado podemos almacenar hasta 10 puntos distintos, basta con pulsar el boton “Sobreescribir” y se almacenará la información de dicho punto en la posición de la lista seleccionada (definido por el número de la lista desplegable de “Datos del punto:”). También existe un desplegable para seleccionar el estado de la pinza. Aunque no se haya incluido un elemento terminal de tal tipo, el programa se ha dejado preparado para conectarse a otro servomotor, encargado del movimiento de la herramienta. Actualmente el programa pasa un 0 cuando dicho elemento está cerrado, y un 1 cuando está abierto. Los dos botones restantes se encargan de cargar movimientos al robot. En el primer caso carga el movimiento de la lista que está en ese momento mostrándose, y en el segundo carga toda la secuencia de 10 movimientos, dejando un margen de 5 segundos entre movimiento y movimiento.
- Zona 4: En este área es donde se representa una previsualización del robot. Cuando el movimiento se calcula el programa proporciona 5 imágenes: perspectiva, alzado, planta, perfil izquierdo y perfil derecho. Se puede alternar entre estas imágenes seleccionando la que se desee ver de entre las opciones de la lista desplegable.

Como se ha indicado, el programa tiene la capacidad de almacenar hasta 10 coordenadas, sin embargo estas no se guardan entre sesiones. La justificación de esto es que no se quiere que alguien pueda ejecutar la secuencia de alguna sesión anterior sin conocer que movimientos va a realizar el robot, y así evitar algún accidente por desconocimiento de la trayectoria. Por defecto, todos los puntos de la lista al iniciar el programa están colocados en la posición 0, con los brazos horizontales. De esta forma si el usuario no sobrescribe los puntos, el robot volverá a su posición de reposo.

Como se mostró en el capítulo 5, existen limitaciones en el movimiento del robot. El proceso de cálculo revisa la posibilidad de poder alcanzar dicho punto y, de no ser posible, obtendremos el siguiente mensaje:

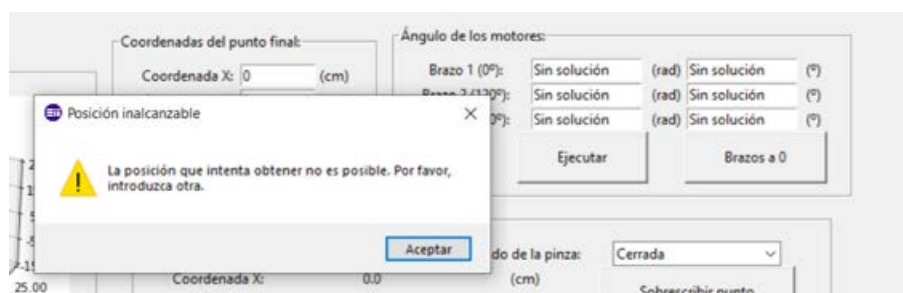


Figura 58: Error de coordenada inalcanzable

Bastará con pulsar aceptar y podremos intentar introducir otro punto. Cuando se quiera cerrar el programa, aparecerá otra ventana emergente:

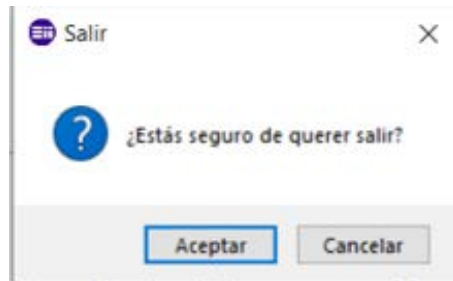


Figura 59: Ventana emergente al cerrar el programa

Este proceso es necesario ya que al cerrar el programa queremos cerrar la conexión con el puerto serie con el que el programa se comunica con la placa Arduino. Si esto no se hiciese, la siguiente vez que se abriese el programa detectaría que el puerto serie está en uso y no podrá iniciarse. Del mismo modo, si se apaga el ordenador todos los puertos se cierran de forma automática.

C. ANEXO C: Ensayos

Debido a la larga extensión de las tablas de los ensayos, se ha decidido mostrar los datos completos dentro de este anexo.

C.1. Ensayo 1 - Coordenada objetivo (4,3,-10)

Los datos de este ensayo son:

Origen (X,Y,Z)	Desfase (mm)	
Pto. Origen(0, 0,-5)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(0,0 ,2)	X	0
	Y	3
Pto. Origen(5,5,-8)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(7,3,-4)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(12,10,0)	X	1
	Y	-3
Pto. Origen(16,8,2)	X	-1
	Y	0
Pto. Origen(4,-4,-8)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(2,-6,-4)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(8,-4,0)	X	-1
	Y	-3
Pto. Origen(10,-14 ,2)	X	-1
	Y	3
Pto. Origen(-5, 5, -8)	X	-5
	Y	-1
Pto. Origen(-1,5,-4)	X	-1
	Y	1
Pto. Origen(-7,3,0)	X	-1
	Y	0
Pto. Origen(-9,12 ,2)	X	-2
	Y	-3
Pto. Origen(-3, -3, -8)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(-4,-2, -4)	X	0
	Y	-2
Pto. Origen(-6,-8,0)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(-12,-9,2)	X	1
	Y	1
Pto. Origen(4,-5,5)	X	1
	Y	0
Pto. Origen(-8,7,5)	X	0
	Y	-2

Tabla 5: Resultados del ensayo 1

Representación gráfica de la tabla 5:

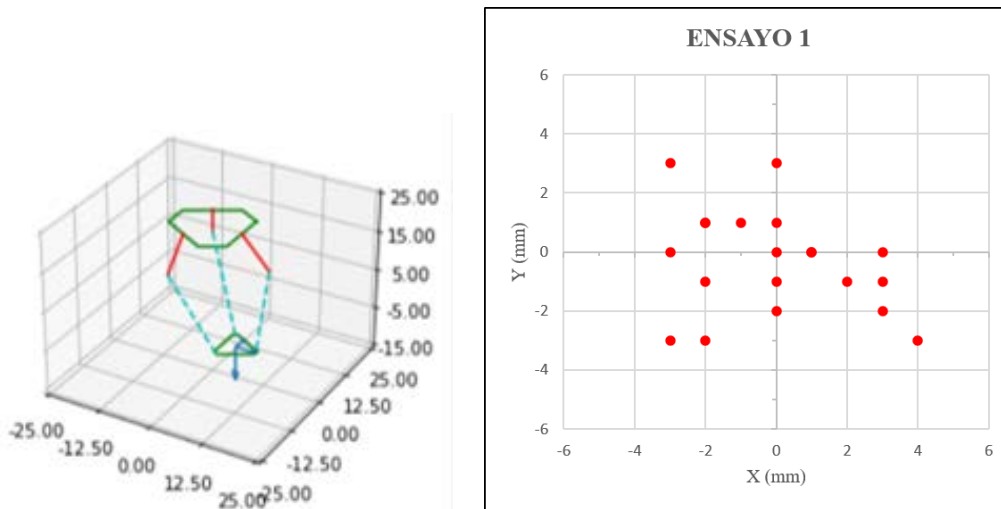


Figura 60: Representación del ensayo 1

Calculando la media y la varianza de la tabla 5 obtenemos la tabla 6:

Media	X	-0,600
	Y	-0,350
Varianza	X	1,726
	Y	3,082

Tabla 6: Media y varianza para los datos del ensayo 1

Este es el ensayo presente en el capítulo 5, y tal y como se indicó en ese apartado el robot presenta buena exactitud pero mala precisión.

C.2. Ensayo 2 - Coordenada objetivo (-2,-4,-8)

Origen (X,Y,Z)	Desfase (mm)
Pto. Origen(0, 0,-5)	X 0
	Y -1
Pto. Origen(0,0 ,2)	X 1
	Y 0
Pto. Origen(5,5,-6)	X 0
	Y 1
Pto. Origen(7,3,-4)	X 0
	Y -2
Pto. Origen(12,10,0)	X 1
	Y -1
Pto. Origen(16,8,2)	X 0
	Y -3
Pto. Origen(4,-4,-8)	X 1
	Y 4
Pto. Origen(2,-6,-4)	X 1
	Y 1
Pto. Origen(8,-4,0)	X -1
	Y -1
Pto. Origen(10,-14 ,2)	X 0
	Y -2
Pto. Origen(-5, 5, -8)	X 2
	Y 1
Pto. Origen(-1,5,-4)	X 2
	Y -1
Pto. Origen(-7,3,0)	X -2
	Y 0
Pto. Origen(-9,12 ,2)	X 1
	Y 0
Pto. Origen(-6, -6, -8)	X 0
	Y 1
Pto. Origen(-4,-2, -4)	X 2
	Y 0
Pto. Origen(-6,-8,0)	X 3
	Y 1
Pto. Origen(-12,-9,2)	X -1
	Y 0
Pto. Origen(4,-5,5)	X 0
	Y 0
Pto. Origen(-8,7,5)	X 4
	Y 0

Tabla 7: Resultados del ensayo 2

Representación gráfica de la tabla 7:

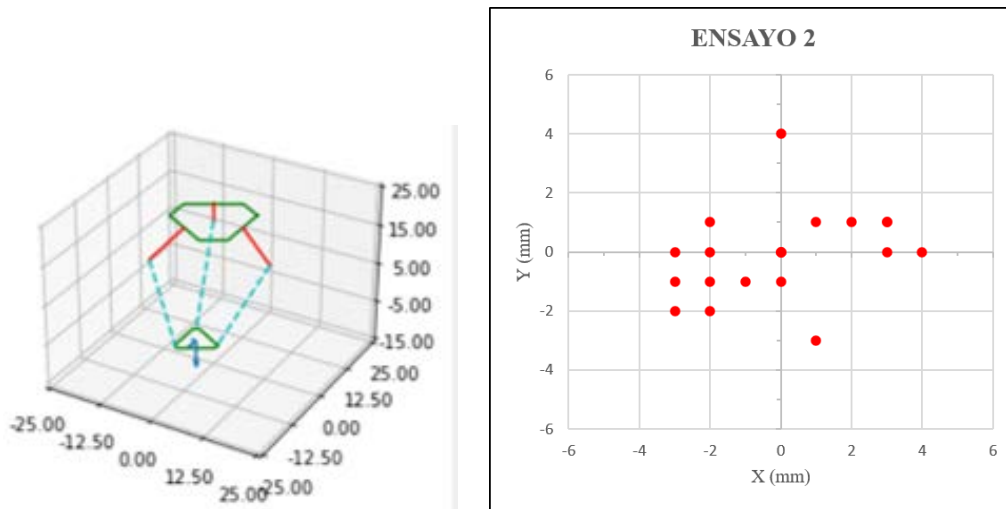


Figura 61: Representación del ensayo 2

Calculando la media y la varianza de la tabla 7 obtenemos la tabla 8:

Media	X	0,700
	Y	-0,100
Varianza	X	2,011
	Y	2,200

Tabla 8: Media y varianza para los datos del ensayo 2

Al igual que en el ensayo anterior, el robot presenta buena exactitud pero mala precisión.

C.3. Ensayo 3 - Coordenada objetivo (5,-1,-5)

Origen (X,Y,Z)	Desfase (mm)
Pto. Origen(0, 0,-3)	X -1
	Y 1
Pto. Origen(0,0 ,2)	X -2
	Y 0
Pto. Origen(6,6,-5)	X -3
	Y 2
Pto. Origen(7,3,-4)	X 1
	Y 4
Pto. Origen(12,10,0)	X -3
	Y 1
Pto. Origen(16,8,2)	X -2
	Y 0
Pto. Origen(4,-4,-5)	X -3
	Y 1
Pto. Origen(2,-6,-4)	X -3
	Y 3
Pto. Origen(8,-4,0)	X -2
	Y 2
Pto. Origen(10,-14 ,2)	X 0
	Y 4
Pto. Origen(-5, 5, -5)	X -2
	Y 0
Pto. Origen(-1,5,-4)	X -4
	Y 1
Pto. Origen(-7,3,0)	X -4
	Y 0
Pto. Origen(-9,12 ,2)	X -1
	Y -1
Pto. Origen(-6, -6, -5)	X 0
	Y 1
Pto. Origen(-4,-2, -4)	X -3
	Y -1
Pto. Origen(-6,-8,0)	X -4
	Y 2
Pto. Origen(-12,-9,2)	X -3
	Y 3
Pto. Origen(4,-5,5)	X -1
	Y 4
Pto. Origen(-8,7,5)	X 0
	Y 1

Tabla 9: Resultados del ensayo

Representación gráfica de la tabla 9:

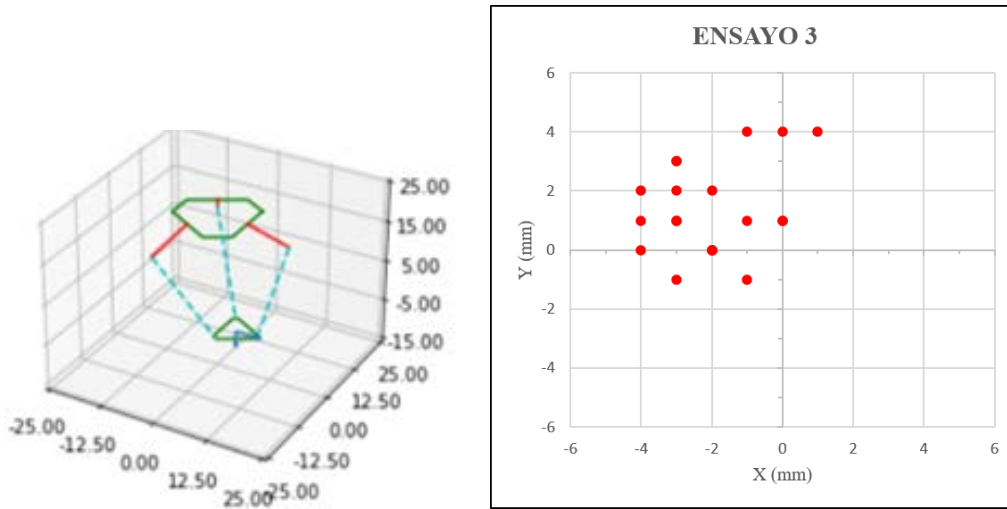


Figura 62: Representación del ensayo 3

Calculando la media y la varianza de la tabla 9 obtenemos la tabla 10:

Media	X	-2,000
	Y	1,400
Varianza	X	2,211
	Y	2,463

Tabla 10: Media y varianza para los datos del ensayo 3

En este caso se aprecia como al ascender (este ensayo es a una altura Z superior) el robot tiende a tener mayor dificultad para mantenerse centrado, mostrando una desviación hacia el eje central. El que el punto final esté tan elevado implica que los movimientos posibles del robot deben estar a una cota superior a igual o superior a la de ese punto, por lo que estará trabajando en condiciones más cercanas al límite superior (que se sitúa en $Z=5$) que en el resto de los ensayos. Esto refuerza la idea de que el espacio en el que suele trabajar el robot es alejado de los extremos de su espacio de trabajo.

C.4. Ensayo 4 - Coordenada objetivo (-3,2,-9)

Origen (X,Y,Z)	Desfase (mm)	
Pto. Origen(0, 0,-5)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(0,0 ,2)	X	1
	Y	-1
Pto. Origen(5,5,-8)	X	0
	Y	3
Pto. Origen(7,3,-4)	X	1
	Y	0
Pto. Origen(12,10,0)	X	-1
	Y	0
Pto. Origen(16,8,2)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(4,-4,-8)	X	-1
	Y	-2
Pto. Origen(2,-6,-4)	X	1
	Y	1
Pto. Origen(8,-4,0)	X	3
	Y	-2
Pto. Origen(10,-14 ,2)	X	-2
	Y	-1
Pto. Origen(-5, 5, -8)	X	1
	Y	-1
Pto. Origen(-1,5,-4)	X	-2
	Y	-1
Pto. Origen(-7,3,0)	X	-1
	Y	-1
Pto. Origen(-9,12 ,2)	X	0
	Y	-3
Pto. Origen(-3, -3, -8)	X	-1
	Y	1
Pto. Origen(-4,-2, -4)	X	1
	Y	0
Pto. Origen(-6,-8,0)	X	0
	Y	2
Pto. Origen(-12,-9,2)	X	1
	Y	0
Pto. Origen(4,-5,5)	X	0
	Y	2
Pto. Origen(-8,7,5)	X	-1
	Y	0

Tabla 11: Resultados del ensayo 4

Representación gráfica de la tabla 11:

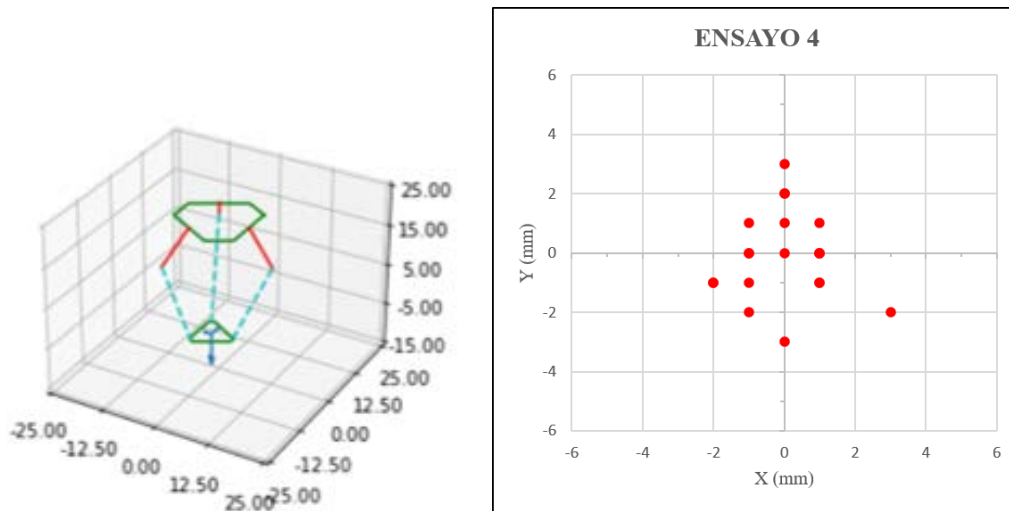


Figura 63: Representación del ensayo 4

Calculando la media y la varianza de la tabla 11 obtenemos la tabla 12:

Media	X	0,000
	Y	-0,100
Varianza	X	1,474
	Y	2,200

Tabla 12: Media y varianza para los datos del ensayo 4

Al volver a trabajar en condicione smás similares vemos que el robot vuelve a presentar la misma respuesta, con buena exactitud pero mala precisión.

C.5. Ensayo 5 - Coordenada objetivo (0,0,-13)

Origen (X,Y,Z)	Desfase (mm)	
Pto. Origen(0, 0,-5)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(0,0 ,2)	X	0
	Y	0
Pto. Origen(5,5,-8)	X	1
	Y	0
Pto. Origen(7,3,-4)	X	-2
	Y	2
Pto. Origen(12,10,0)	X	-2
	Y	-2
Pto. Origen(16,8,2)	X	1
	Y	-1
Pto. Origen(4,-4,-8)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(2,-6,-4)	X	-2
	Y	2
Pto. Origen(8,-4,0)	X	-3
	Y	1
Pto. Origen(10,-14 ,2)	X	-3
	Y	0
Pto. Origen(-5, 5, -8)	X	3
	Y	1
Pto. Origen(-1,5,-4)	X	-1
	Y	0
Pto. Origen(-7,3,0)	X	0
	Y	1
Pto. Origen(-9,12 ,2)	X	4
	Y	0
Pto. Origen(-3, -3, -8)	X	2
	Y	-2
Pto. Origen(-4,-2, -4)	X	3
	Y	0
Pto. Origen(-6,-8,0)	X	3
	Y	0
Pto. Origen(-12,-9,2)	X	-2
	Y	2
Pto. Origen(4,-5,5)	X	-3
	Y	0
Pto. Origen(-8,7,5)	X	0
	Y	2

Tabla 13: Resultados del ensayo 5

Representación gráfica de la tabla 13:

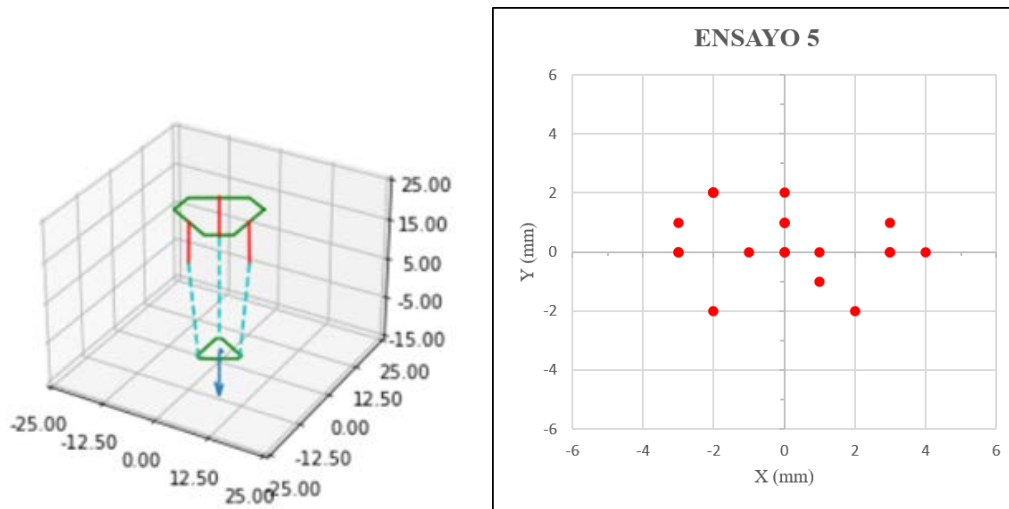


Figura 64: Representación del ensayo 5

Calculando la media y la varianza de la tabla 13 obtenemos la tabla 14:

Media	X	-0,050
	Y	0,350
Varianza	X	4,892
	Y	1,397

Tabla 14: Media y varianza para los datos del ensayo 5

En este ultimo caso podemos observar que la varianza aumenta sustancialmente en el movimiento X. Esto es debido principalmente que al ser el punto más bajo posible, a la hora de realizar el movimiento supone también las trayectorias más largas y, por tanto, la plataforma inferior adquiere mayor velocidad. Aunque los robots paralelos son más rígidos que los robots serie, a la escala de este trabajo y con los materiales con los que se está trabajando existen unas limitaciones a la hora de la capacidad del robot de absorber el movimiento. A su vez el brazo 1 se encientra alineado con el eje X, por lo que la articulación secundaria de dicho brazo no ofrece resistencia (ya que todas las articulaciones excepto las controladas por los servomotores giran libremente) lo cual disminute la rigidez en esa dirección (por eso se aprecia el aumento de varianza en el eje X).

D. ANEXO D: Análisis económico

D.1. Introducción

En este anexo analizaremos de forma aproximada el coste que supone crear un robot de estas características.

En este trabajo se hace gran uso de la impresión 3D, pero para este análisis suponemos que tenemos acceso a una impresora 3D, y los gastos derivados de la compra o alquiler del servicio no están presentes en este anexo.

D.2. Aproximación a los costes

A la hora de considerar los costes se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Algunos elementos vienen empaquetados en grupos más grandes que los necesarios, pero vamos a suponer necesario comprar el paquete entero, aunque una parte luego no se vaya a utilizar. Esto ocurre con los tornillos y tuercas.
- Por el contrario, existen elementos que se pueden comprar de forma individual o de forma grupal, como es el caso de los servomotores. Se optó por comprar el paquete de 4, ya que se necesitaban 3 y el precio unidad era más barata que si se compraran por separado. El grupo de 4 servomotores supuso un coste de 20€, por lo que la parte aplicable a este proyecto son 15€.
- Las bobinas de PLA vienen definidas principalmente por el peso de la misma, y aunque existen diferentes tamaños, el más común son las bobinas de 1kg. El precio de dichas bobinas fluctua dependiendo del vendedor, color y calidad del plástico, pero hemos supuesto un precio promedio de 22€. Tan sólo se tendrá en cuenta el coste del plástico utilizado, ya que el PLA restante puede ser usado en otros proyectos. Retomando el último párrafo del Anexo A la cantidad de PLA utilizada son 346g, por lo que su coste será de 7,61€
- El uso de la impresora 3D supone un consumo de electricidad, del cual es más complicado conocer un coste concreto, ya que dicho precio puede variar, y es difícil aislar el coste de la impresora del resto de consumo de la vivienda. Por ello vamos a realizar una aproximación de que la electricidad supone el 20 % del coste resultante de todos los componentes.

Con todo esto, en la tabla siguiente podemos observar los costes aproximados de los componentes:

PLA (346g)	7,61€
Servomotores MG996R (3 ud.)	15,00€
Tornillos M4x16	1,99€
Tornillos M4x20 (2 ud.)	3,98€
Tuercas autoblocantes M4	1,99€
Placa Arduino Mega	13,99€
Protoboard	3,95€
Cableado variado	10,00€
Fuente de alimentación	8,95€
TOTAL COMPONENTES	67,46€
Coste electricidad (20 %)	13,49€
TOTAL	80,95€

Tabla 15: Costes aproximados

Por tanto, si quisiésemos reproducir el robot creado en este trabajo, supondría un coste aproximado de **80,95€**.

E. ANEXO E: Planos

En este anexo presentamos los planos de conjunto y piezas diseñadas en 3-D del robot Delta.