



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Diseño, fabricación y puesta en marcha de una  
Plataforma Stewart para simulación*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** José Luis Burrueco Jiménez  
**DIRECTORES:** José María Núñez Ortuño  
Carlos Casqueiro Placer  
**CURSO ACADÉMICO:** 2015-2016

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

*Diseño, fabricación y puesta en marcha de una  
Plataforma Stewart para simulación*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General







## RESUMEN

El presente proyecto trata sobre el diseño, la fabricación y la puesta en marcha de un robot paralelo del tipo Stewart-Gough de 6 grados de libertad, de coste reducido y el cálculo de sus especificaciones técnicas. El diseño del proyecto pretende marcar un inicio en el desarrollo de esta plataforma, permitiendo futuras líneas de investigación y desarrollo basadas en el presente robot, así como proponer soluciones que permitan la escalabilidad del modelo.

La implementación se lleva a cabo mediante el uso de servomotores como actuadores y su resolución del problema cinemático transcurre en un ordenador aparte, utilizando para ello el software informático MathWorks MATLAB 2016 y como plataforma electrónica el hardware libre Arduino.

Se proporciona un método alternativo al uso de las matrices de rotación para obtener la cinemática inversa de la plataforma de manera exacta. La fabricación se siguiendo la línea del *Rapid Prototyping* e impresión 3D. El diseño final se compara con los ensayos realizados sobre el proyecto para validar el rendimiento del robot paralelo. Finalmente se presentan unas líneas de mejora y se abre nuevos caminos para su posterior desarrollo en el ámbito miliar.

## PALABRAS CLAVE

Plataforma Stewart-Gough, Robot Paralelo, 6 Grados de Libertad, Servomotores, Arduino, Matlab



# **AGRADECIMIENTOS**

A mi tío Ricardo, quien me inculcó el amor por la ingeniería y la mecánica, y a quien le debo la mayor parte de lo que soy. A mis tutores, por el apoyo recibido. Y a mis queridos Nacho, Luís y Carlos, con los que siempre pude contar en los momentos más inoportunos. Sin su ayuda, no hubiese acabado el proyecto justo a tiempo, lo hubiese terminado mucho antes...

José Luis







# CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Requerimientos iniciales .....	8
1.3 Desarrollo.....	8
2 Estado del arte .....	9
2.1 Antecedentes históricos.....	9
2.2 Plataforma Stewart – Gough .....	11
2.3 Características de la Plataforma Stewart-Gough .....	12
2.4 Resolución de la cinemática del robot .....	14
2.5 Aplicaciones de la Plataforma Stewart .....	15
2.5.1 Herramientas de mecanizado .....	15
2.5.2 Manipuladores de objetos de alta precisión.....	16
2.5.3 Simuladores con plataforma móvil.....	17
2.5.4 Medicina .....	18
2.6 Proyectos a pequeña escala .....	19
3 Desarrollo del TFG.....	21
3.1 Introducción .....	21
3.1.1 Planeamiento.....	21
3.1.2 Desarrollo del proyecto.....	22
3.1.3 Software utilizado .....	23
3.2 Modelado .....	25
3.2.1 Método de resolución .....	26
3.2.2 Resolución matemática.....	28
3.3 Diseño del Hardware.....	36
3.3.1 Diseño preliminar .....	36
3.3.2 Diseño detallado .....	38
3.4 Diseño del Software .....	51
3.4.1 Programa esclavo en Arduino UNO .....	51
3.4.2 Programa maestro en MATLAB .....	54
3.4.3 Protocolo de comunicación.....	56
3.5 Fabricación y montaje .....	57

3.5.1 Fabricación: Impresión 3D .....	57
3.5.2 Ensamblaje.....	59
3.5.3 Calibración.....	60
3.5.4 Presupuesto .....	61
3.6 Análisis de la plataforma.....	62
3.6.1 Obtención de las posiciones límites de trabajo.....	62
3.6.2 Obtención de la velocidades/aceleraciones máximas .....	65
3.6.3 Cálculo de la carga máxima.....	67
3.6.4 Estudio por elementos finitos .....	69
3.6.5 Resultados y conclusiones .....	75
4 Resultados / Validación / Prueba.....	76
4.1 Introducción .....	76
4.2 Ensayos .....	76
4.2.1 Ensayo de espacio de trabajo.....	76
4.2.2 Ensayo de cargas.....	78
4.2.3 Ensayo de velocidad .....	80
4.3 Resultados .....	81
5 Conclusiones y líneas futuras .....	82
5.1 Descripción del apartado.....	82
5.2 Objetivos alcanzados.....	82
5.3 Lecciones aprendidas .....	82
5.4 Propuestas .....	83
6 Bibliografía.....	84
Anexo I: Código Maestro MATLAB .....	87
Anexo II: Código esclavo Arduino.....	91
Anexo III: Planos.....	94
Anexo IV: Simulaciones estructurales .....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 "Elektro and Sparko at the World's Fair" 1939.....	9
Figura 2-2 Fábrica de Changying Precision Technology en Dongguan.....	10
Figura 2-3 Plataforma de Gough 1962.....	11
Figura 2-4 Plataforma de Mr. Stewart 1965.....	12
Figura 2-5 "Stewart Platform" (Fuente: Mathworks [7]).....	13
Figura 2-6 Modelo de una Plataforma Stewart (Fuente: Mathworks[7]).....	13
Figura 2-7: Configuraciones clásicas mediante actuadores lineales (Fuente: [3]).....	13
Figura 2-8 Ejemplo de dos soluciones para una posición final.....	14
Figura 2-9 Space 5H de Fatronik-Tecnalia.....	15
Figura 2-10 Raymond Clavel y su invento.....	16
Figura 2-11 Utilización del Robot Delta en la industria alimentaria.....	16
Figura 2-12 Simulador de vuelo 6 DOF de Lufthansa.....	17
Figura 2-13 Simulador de conducción NORD Drivesystem 2015.....	17
Figura 2-14 Simulador de marcha (Fuente: José Luís Zarate).....	18
Figura 2-15 Robot RoboTENIS (Fuente: www.upm.es).....	19
Figura 2-16 Plataforma Stewart de N. Gonzales Álvarez y E. Reinoso Mendoza.....	20
Figura 2-17 "MiniStew" (Fuente: www.youtube.com).....	20
Figura 3-1 Esquema de la solución planteada.....	22
Figura 3-2 MathWorks MATLAB (Fuente: www.mathworks.com).....	23
Figura 3-3 Captura de Autodesk Inventor.....	24
Figura 3-4 IDE Microsoft Visual Studio 2013 + plugin Visual Micro.....	25
Figura 3-5: Modelado simple de elementos.....	26
Figura 3-6: Modelado de la solución.....	27
Figura 3-7 Propiedad no conmutativa de los giros.....	30
Figura 3-8 Modelado de la posición final del efector.....	31
Figura 3-9 Transformación 3D a 2D.....	32
Figura 3-10 Intersección entre un plano y una circunferencia.....	33
Figura 3-11 Modelado final de la Plataforma.....	35
Figura 3-12 Diseño preliminar.....	37
Figura 3-13 Filamento de PLA para impresión 3D.....	38
Figura 3-14 TGY-S901D de la casa Turnigy.....	39
Figura 3-15 Varilla de mando de aluminio roscada M3.....	40
Figura 3-16 Rótula de plástico.....	40

Figura 3-17 Rótula de aluminio.....	40
Figura 3-18 Arduino UNO .....	41
Figura 3-19 Esquinas antes.....	42
Figura 3-20 Esquinas después .....	42
Figura 3-21 Distancia mínima entre dos servomotores.....	43
Figura 3-22 Anclaje de los servos .....	43
Figura 3-23 Anclaje de la placa electrónica .....	44
Figura 3-24 Estructura piramidal del diseño .....	45
Figura 3-25 Servos y brazos trabajando en planos paralelos .....	45
Figura 3-26 Anclaje al efector inclinado .....	46
Figura 3-27 Parte superior del efector .....	46
Figura 3-28 Parte inferior del efector .....	46
Figura 3-29 Como afecta la longitud del brazo o al ángulo de giro .....	47
Figura 3-30 Detalle del brazo del servo .....	48
Figura 3-31 Orificios para las conexiones.....	48
Figura 3-32 Imagen renderizada de la Plataforma Stewart .....	50
Figura 3-33 Control de servomotor mediante ancho de pulsos.....	51
Figura 3-34 Diagrama del código Arduino General.....	52
Figura 3-35 Diagrama de Flujo Función LeerSerial().....	53
Figura 3-36 Diagrama de funcionamiento general del programa Maestro de MATLAB .....	55
Figura 3-37 Impresora Witbox 3D .....	57
Figura 3-38 Impresión del efector tras 40 min .....	58
Figura 3-39 Impresión del efector tras 2h 30 min .....	58
Figura 3-40 Piezas impresas.....	59
Figura 3-41 Ensamblaje (Anexo III: Planos).....	59
Figura 3-42 Plataforma Stewart ensamblada.....	60
Figura 3-43 Recopilación de medidas utilizando intersecciones de planos .....	62
Figura 3-44 Área de trabajo (Fuente: [19]) .....	63
Figura 3-45 Espacio de trabajo la plataforma.....	63
Figura 3-46 Espacio de trabajo: Vista X .....	64
Figura 3-47 Espacio de trabajo: Vista Y .....	64
Figura 3-48 Home Position .....	65
Figura 3-49 Esquema del estudio .....	67
Figura 3-50 Histograma resultado de la simulación.....	68
Figura 3-51 Cargas de la simulación .....	69
Figura 3-52 Restricciones de la simulación.....	69

Figura 3-53 Tensión principal .....	70
Figura 3-54 Desplazamiento .....	71
Figura 3-55 Coeficiente de seguridad.....	71
Figura 3-56 Cargas .....	72
Figura 3-57 Restricciones.....	72
Figura 3-58 Tensión principal .....	73
Figura 3-59 Desplazamiento .....	73
Figura 3-60 Coeficiente de seguridad.....	74
Figura 3-61 Características técnicas .....	75
Figura 4-1 Posiciones simuladas y ensayadas XZ.....	77
Figura 4-2 Posiciones simuladas y ensayadas YZ.....	78
Figura 4-3 Gráfico de distancias obtenidas .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Especificaciones mecánicas del PLA (Fuente: [18]) .....	38
Tabla 3-2 Características técnicas del servo TGY-S901D.....	39
Tabla 3-3 Características Arduino UNO .....	41
Tabla 3-4 Presupuesto .....	61
Tabla 3-5 Simulación cinemática .....	66
Tabla 3-6 Simulación de cargas .....	68
Tabla 4-1 Resultados del ensayo espacio de trabajo XZ.....	76
Tabla 4-2 Resultados espacio de trabajo YZ.....	77
Tabla 4-3 Ensayo de cargas.....	79
Tabla 4-4 Datos obtenidos.....	80
Tabla 4-5 Características técnicas ensayadas .....	81

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción

El presente proyecto trata sobre el diseño de una plataforma Stewart-Gough, su puesta en funcionamiento y el análisis de sus especificaciones. Toda la implementación de la plataforma debe poder desarrollarse a bajo coste, lo que marcará su diseño y la selección de elementos del robot.

Una Plataforma Stewart-Gough se puede definir como una maquina programable con capacidad para ubicar y orientar uno de sus miembros en cualquier posición dentro de un espacio definido. La primera plataforma de este tipo fue diseñada por primera vez por el ingeniero inglés Gough, y desarrollada por el americano Stewart, de ahí su nombre. Su movimiento se realizaba con actuadores lineales, a diferencia de la plataforma desarrollada en este proyecto, cuyos actuadores son de giro o servomotores.

El prototipo que aquí se presenta respeta los requerimientos iniciales de diseño, intentando siempre conseguir el mayor rendimiento posible. En esta memoria se describen paso a paso cada uno los criterios, elecciones y posterior desarrollo de cada uno de los diferentes aspectos que se han tenido presentes en la implementación de este robot paralelo.

Durante el proyecto, se plantea una manera alternativa de utilizar las matrices de rotación para conseguir la solución a la cinemática inversa de este robot paralelo sin utilizar aproximaciones o métodos iterativos de convergencia.

El modelo final es un prototipo de plataforma Stewart-Gough, de pequeñas dimensiones, totalmente funcional y con una serie de características técnicas que lo convierte en robot muy sólido frente a otros robots similares.

El diseño completo se realiza mediante la utilización de software CAD Autodesk Inventor 2016, el lenguaje matemático y entorno multiuso MathWorks MATLAB 2013a y la IDE de desarrollo Microsoft Visual Studio 2013.

La integración de hardware y software se realiza con el uso de una placa Arduino UNO. Esta placa permite el control de la plataforma desde el ordenador.

## 1.2 Requerimientos iniciales

La realización de este proyecto consiste en el desarrollo de una plataforma Stewart-Gough de 6 grados de libertad, totalmente funcional y de costo reducido. La plataforma Stewart debe ser capaz de repetir un movimiento requerido, bien simulado, o bien mediante una entrada con los cada uno de los 6 grados de libertad.

Otro requisito del proyecto es la obtención de las especificaciones técnicas del mecanismo, así como una comprobación con los parámetros teóricos obtenidos mediante análisis práctico y ensayos.

Finalmente, el proyecto debe ser económico y funcional. Para comprobar el correcto desempeño de las funciones que se le exigen, se realizan una serie de ensayos y demostraciones.

## 1.3 Desarrollo

El primer punto del trabajo es una breve introducción a los robots paralelos, la historia de la plataforma Stewart, los trabajos realizados en su estudio y la utilización de este tipo de robots paralelos a día de hoy.

En el desarrollo del proyecto se presenta el problema y el estudio previo al proceso de diseño. Se dan a conocer las prioridades y su peso en el diseño.

Se modela un prototipo previo y se explica la solución a la obtención de la cinemática planteada, con matices propios de este proyecto. Este modelo es de gran utilidad en simulaciones y comprobaciones, así como en la optimización de los parámetros de diseño.

Se distingue entre el desarrollo de la parte del software que emplea la plataforma, y la parte del hardware. El desarrollo de la parte del software se divide en la explicación del software instalado en la placa controladora Arduino, y en código desarrollado en MATLAB para el control externo de la plataforma.

Durante el diseño del hardware se explica paso a paso el método utilizado para la fabricación del prototipo, y como afectan algunos de sus parámetros a las especificaciones técnicas finales. Se detalla el porqué de cada elección y lo que se pretende conseguir en cada una de ellas.

En el apartado de fabricación, se describe como se crean las piezas diseñadas y el presupuesto de los elementos.

El análisis final pretende conocer las especificaciones técnicas finales de la plataforma diseñada. De esta forma se podría optimizar cualquier parámetro sin necesidad de construir el prototipo previo. Se calcula, entre otros, el espacio de trabajo, breve estudio cinemático y cargas máximas soportadas.

Tras el diseño, se realiza una serie de ensayos con el objetivo de calcular las especificaciones técnicas reales, sometiendo el prototipo a pruebas de esfuerzo. Los resultados obtenidos se analizan y se obtienen las especificaciones de la plataforma Stewart.

Finalmente, se explican las conclusiones obtenidas en la realización de este proyecto, así como las propuestas de futuras líneas de investigación y desarrollo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Antecedentes históricos

Desde que el primer ser humano utilizó por primera vez una herramienta hasta el desarrollo de los robots actuales, la humanidad ha experimentado un largo viaje de desarrollo siempre con la misma idea presente, conseguir que las maquinas facilitasen o suplieran a las personas en el desarrollo de sus trabajos. Con esta premisa, de rudas herramientas se avanzó a complejas maquinas que con el paso del tiempo se convertirían en programables, y con el desarrollo de la electrónica y la miniaturización se llegaría a los niveles de desarrollo con los que hoy contamos.

Si bien los primeros pasos de la robótica los podemos datar alrededor del siglo IV a.C. con los artilugios mecánicos de Arquitas de Tarento, la robótica moderna se ha desarrollado por completo en el siglo XX. Desde el increíble robot "Elektro" y su perro "Sparko", presentados por Westinghouse en la feria mundial de Nueva York en 1939, hasta el famoso robot "ASIMO" (Advanced Step in Innovative Mobility) creado en el 2000 por la marca japonesa Honda, grandes ingenieros han dedicado su vida a la realización de máquinas cada vez más inteligentes y funcionales. Turing, Goldstine, Eckert, Mauchly o Devol son solo una pequeña muestra de los grandes genios que han trabajado y contribuido de manera notable al campo de la robótica.



Figura 2-1 "Elektro and Sparko at the World's Fair" 1939

Además de los grandes ingenieros, otro factor que sin duda alguna contribuyó al avance de la robótica fue el desarrollo de la industria, especialmente las cadenas de montaje del sector del automovilismo. La compañía de Henry Ford apostó desde temprano por la utilización de robot en el sector. En 1956 aparece el primer robot comercial basado en la patente de George Devol. “Unimate” trasladaba las piezas fundidas en molde hasta la cadena de montaje de los vehículos para después soldarlas, evitando que los trabajadores se expusieran a inhalar los gases de la combustión o sufrir serios accidentes.

Con la intención de testar neumáticos, el ingeniero Gough inventó en 1954 un tipo de robot paralelo cuyo diseño publicaría más tarde D. Stewart, bautizando su patente con los apellidos de ambos, *Gough/Stewart platform*, siendo su nombre abreviado el que ha perdurado [1].

Hoy en día, el uso de robots industriales está ampliamente extendido y van desde los robots accionados por fines de carrera (*Pick & Place*) hasta los robots controlados por servos y técnicas de inteligencia artificial (*Especiales*), según la clasificación hecha por T.M. Knasel. El taller de la empresa Changying Precision Technology (Figura 2-2) ha sustituido por completo su plantilla de trabajadores, instalando en su lugar un ejército de 60 brazos robóticos capaces de sustituir a 650 trabajadores. [2]



**Figura 2-2** Fábrica de Changying Precision Technology en Dongguan

Con el avance de la tecnología y el abaratamiento de los precios, el uso de robots en entornos industriales se hará aún más frecuente y podrán ser introducidos en pequeñas fábricas y talleres, e incluso en los hogares, y todo ello en un futuro no muy lejano.

## 2.2 Plataforma Stewart – Gough

A diferencia de los robots en serie, los robots paralelos entrelazan varias cadenas cinemáticas para conseguir obtener la posición y el movimiento necesario en sus articulaciones, por tanto, se define un robot paralelo como:

“*Aquellos robots en los que el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente*”. [3]

La conjunción de varias cadenas cinemáticas dificulta la resolución matemática del problema cinemático, siendo mucho más complejo la obtención de la cinemática en los robots paralelos que los robots en serie. Por el contrario, la estructura de los robots paralelos dotan a este tipo de mecanismo de ventajas respecto a los otros: son más rápidos, no acumulan errores al posicionarse y reparte mejor los esfuerzos en su estructura.

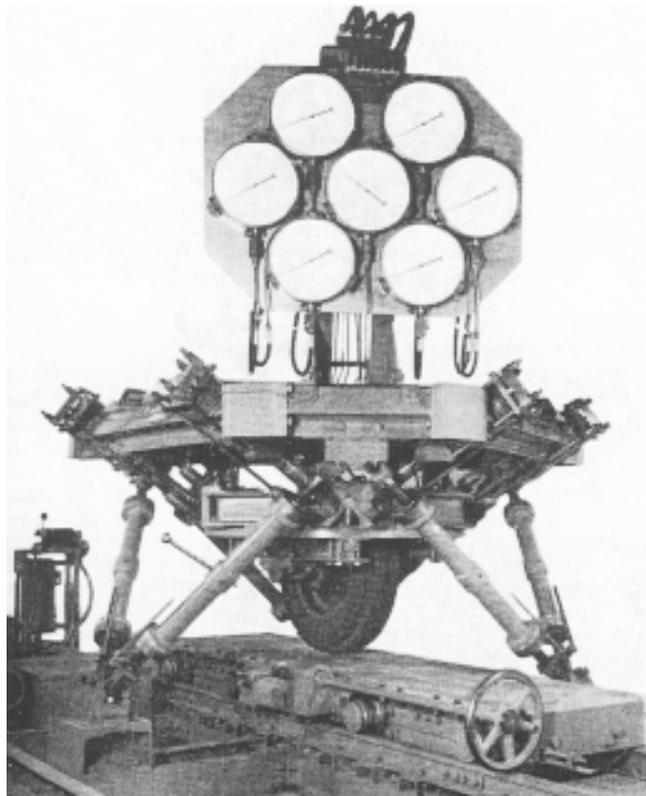
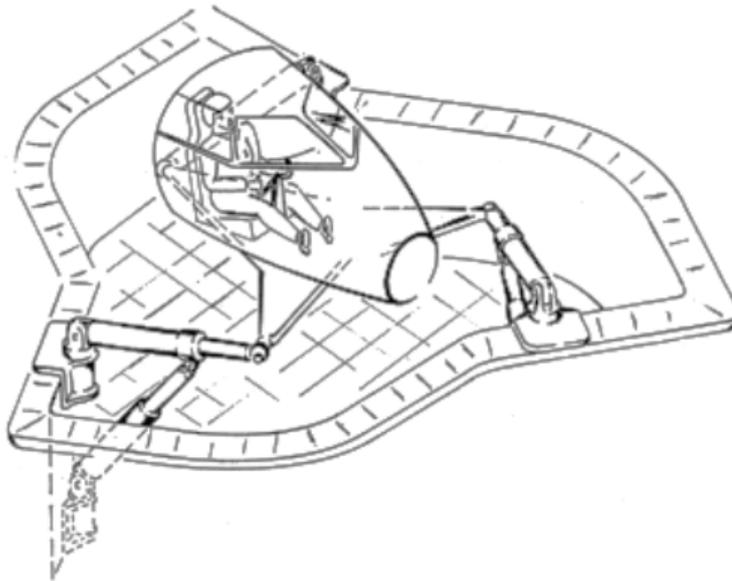


Figura 2-3 Plataforma de Gough 1962

Para realizar ensayos de neumáticos, los ingenieros Gough y Whitehall (1962) desarrollaron una plataforma que llevaría el nombre del primero, y que permitía la simulación de movimiento y la aplicación de fuerzas, dotado de diferentes instrumentos de medida. Con este artilugio pretendían simular el comportamiento de neumáticos *Dunlop* durante el proceso de aterrizaje de los aviones. Sin embargo, no fue hasta 1965, con el inicio de la era espacial, cuando el inglés Stewart propuso su uso para simuladores de vuelo [4], pues la estructura permite 6 grados de libertad (*Degrees Of Freedom*) (6 DOF) y su buena relación de carga admisible/peso propio, de hecho, la carga que se distribuye entre los actuadores es del orden de 1/6 de la carga admisible.



**Figura 2-4 Plataforma de Mr. Stewart 1965**

No sería hasta después de 1983 cuando los investigadores estudiaron detalladamente las estructuras de este robot. La estrategia de utilizar actuadores lineales y juntas universales fue desarrollada por Hunt, quien indicó las ventajas de amplia capacidad de carga y alta habilidad de posicionamiento [5]. Con el desarrollo de Hunt y análisis de la estructura cinemática llevada a cabo por otros investigadores [6] contribuyó al mejor entendimiento del comportamiento de la cinemática y a la aceptación de la Plataforma Stewart como solución a múltiples problemas y al reconocimiento de su potencial dentro de los robots paralelos.

La Plataforma Stewart es, por tanto, un diseño destinado al control de posición y movimiento que articula su base móvil modificando la longitud entre las articulaciones de la base fija y esta.

### **2.3 Características de la Plataforma Stewart-Gough**

El diseño más extendido en la actualidad de una Plataforma Stewart consiste en una base fija y una base móvil unidas entre sí mediante 6 actuadores lineales capaces de modificar su longitud, anclados sus extremos a articulaciones esféricas que permiten los tres giros en el espacio.

Por geometría y diseño, esta plataforma permite una gran gama de movimientos, tanto en la rotación como en la translación, en los tres ejes del espacio. La estructura recursiva que proveen varias cadenas cinemáticas dota a la plataforma de una gran estabilidad y una gran precisión en su posicionamiento, a costa de sacrificar volumen en el espacio de trabajo, mucho más reducido en comparación a robots en serie de proporciones similares.

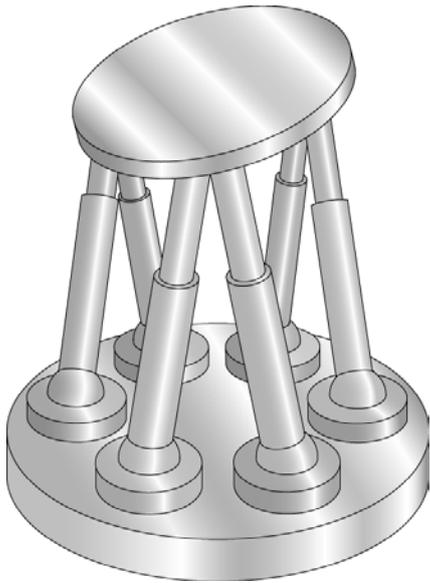


Figura 2-5 "Stewart Platform"  
(Fuente: Mathworks [7])

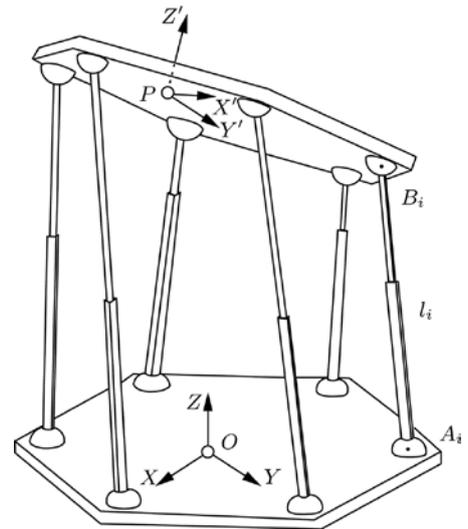


Figura 2-6 Modelo de una Plataforma Stewart  
(Fuente: Mathworks[7] )

Las configuraciones clásicas de las plataformas se pueden describir según se emparejan las articulaciones de ambas bases. Hasta mediados de los ochenta, se podían diferenciar entre dos triángulos unidos sus puntos dos a dos en una configuración denotada como 3-3, o una base fija hexagonal y una móvil triangular, denotada 6-3. Muy pronto se observó que la coincidencia de articulaciones esféricas restringía de forma severa la movilidad. La configuración 6-6 de hexágonos irregulares en ambas bases empezó a ganar protagonismo tras comprobar sus ventajas sobre las restricciones de los otros modelos.

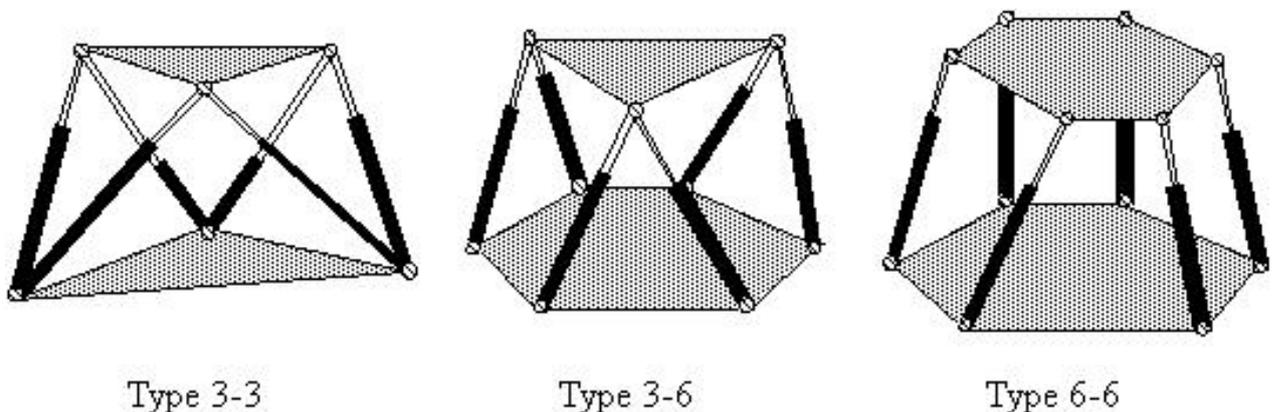


Figura 2-7: Configuraciones clásicas mediante actuadores lineales  
(Fuente: [3])

## 2.4 Resolución de la cinemática del robot

La resolución de la cinemática de un robot, tanto paralelos como en serie, ha sido y es ampliamente estudiada. En concreto, la resolución de la cinemática directa sigue siendo tema de estudio dada la complejidad del cálculo frente a la resolución indirecta. La mayoría de las nuevas soluciones se encuentran orientadas a la resolución del problema con un menor coste computacional.

La obtención de la cinemática directa se puede definir como la obtención de la posición del efector final conociendo la posición de los inicial actuadores.

$$f(q_1, \dots, q_n) = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

Sin embargo, la obtención de la cinemática directa en robots en serie es mucho más sencilla que la obtención de la cinemática inversa. En general, este problema tiene más de una solución, la plataforma de Gough tiene 16 posturas diferentes dadas 6 longitudes de sus actuadores [1]. Para resolver el problema cinemático directo, Ku propone la utilización del método Newton-Raphson como forma más eficiente de resolución [8] mientras que otras soluciones utilizan sensores para medir la posición de sus elementos. Sin embargo, la mayor parte de los estudios se han desarrollado sobre modelos similares a la plataforma de Gough, que difiere de la estructura de la plataforma que se desarrolla en este trabajo, más próxima a plataformas de 3 grados de libertad como el robot DELTA [3].

En los robots paralelos la obtención de la cinemática inversa es más sencilla de obtener que la cinemática directa. Se obtiene la posición de las articulaciones articuladas del robot a partir de la posición final del efector.

$$f(x_f, y_f, z_f, \alpha_f, \beta_f, \gamma_f) = (q_1, \dots, q_n)$$

La mayoría de los robots suelen tener cadenas cinemáticas sencillas, formados por triángulos. La complicación de la resolución aumenta paralelamente con la complejidad de estas cadenas.

La plataforma Stewart que se desarrolla en este trabajo utiliza la resolución por cinemática inversa para obtener los ángulos que son solución del punto del efector final requerido, en general se obtienen dos posibles soluciones por articulación que hacen un total de 64 soluciones (2 elevado a 6) para una misma posición del efector.

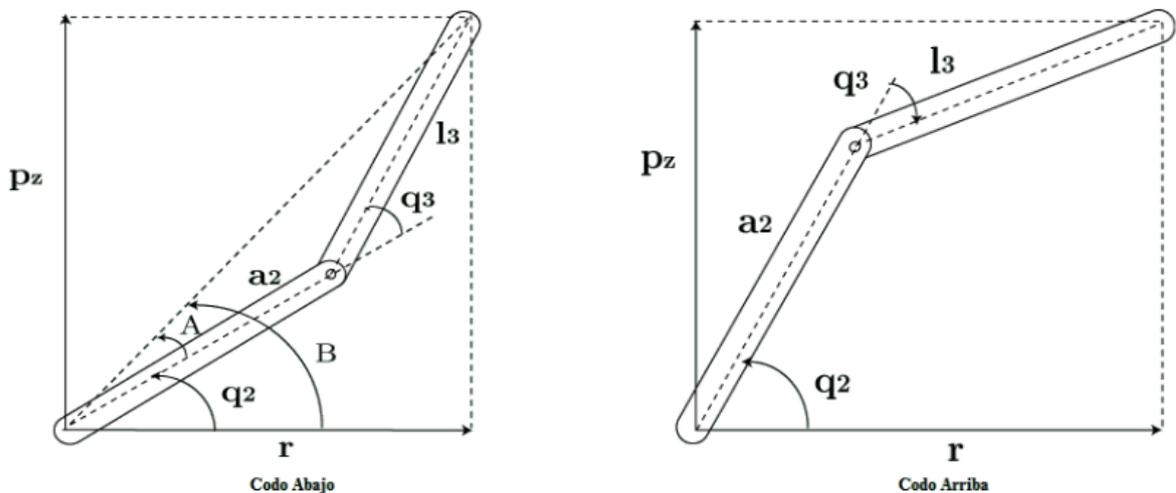


Figura 2-8 Ejemplo de dos soluciones para una posición final

Para obtener la solución a la cinemática inversa se utilizan diversos métodos como la resolución por cuaterniones<sup>1</sup>, métodos geométricos, matrices de transformación y la utilización de los ángulos de Euler. Alguno de los proyectos más interesantes incluye además métodos de análisis numérico y algoritmos híbridos de optimización aumentando su eficiencia computacional [9].

## 2.5 Aplicaciones de la Plataforma Stewart

Los robots paralelos, en especial los robot tipo plataforma de Stewart-Gough son utilizados ampliamente en aplicaciones donde se requiere gran capacidad de carga, un buen desempeño dinámico y precisión de movimiento. Se muestra a continuación diferentes aplicaciones y maquinas diseñados para cumplir con estos cometidos.

### 2.5.1 Herramientas de mecanizado

Las maquinas-herramientas de estructura paralela poseen una gran ventaja en tareas de mecanizado: ninguno de los ejes de actuación lleva apareado otro en movimientos. Como consecuencia de ellos, los accionamientos pueden ser más pequeños, al igual que las masas de movimiento de la máquina. El objetivo de construir maquinas paralelas es alcanzar mayores aceleraciones y aumentar la rigidez.

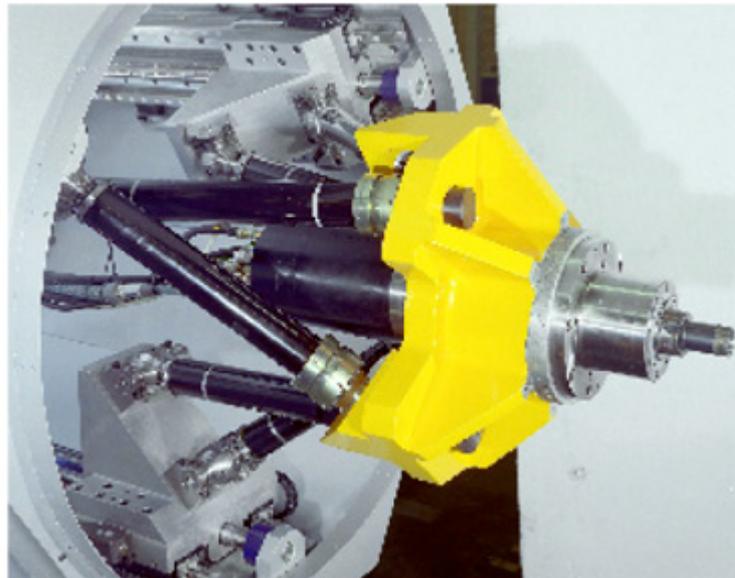


Figura 2-9 Space 5H de Fatronik-Tecnalia

Un ejemplo de ello es la maquina Space 5H de Fatronik-Tecnalia (Figura 2-8), diseñada para el mecanizado en el sector aeronáutico. El estudio realizado por la empresa que lo fabrica compara su patente con un robot convencional (serie). Entre otros resultados, se obtiene que las prestaciones en velocidad y aceleración del efector son mucho mayores, en concreto, para obtener el mismo valor se necesitan actuadores con un par cuatro veces menor. [10].

Es interesante destacar que unos de los mayores problemas en la tecnología de mecanizado de alta velocidad (MAV) llevados a cabo en hexápodos es su calibración, pues aunque su precisión es alta de por sí, los errores en su construcción introducen errores sistemáticos que pueden ser corregidos.

---

<sup>1</sup> Los cuaterniones proporcionan una notación matemática para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones.

### 2.5.2 Manipuladores de objetos de alta precisión

Aunque es cierto que el espacio de trabajo de los robots paralelos es relativamente pequeño en comparación con el tamaño de la máquina, algunos de estos fueron diseñados en exclusiva para estas tareas. La Escuela Politécnica Federal de Lausana desarrollo el robot delta (Figura 2-9), cuya principal característica es el uso de paralelogramos en los brazos, que mantienen la orientación del actuador en el extremo. [11].



**Figura 2-10 Raymond Clavel y su invento**

Su licencia fue comprada en 1987 y comenzó su producción en la industria de envasado, como se puede ver en la Figura 2-10.



**Figura 2-11 Utilización del Robot Delta en la industria alimentaria**

### 2.5.3 Simuladores con plataforma móvil

Uno de los principales usos de este tipo de robots paralelos es la recreación de movimientos y aceleraciones. Como bien advirtió Stewart [4], la plataforma de Gough era un buen punto de partida para proyección de simulares espaciales. Su utilización para el entrenamiento de pilotos, ha sido explotada desde sus inicios por la industria aeroespacial.



Figura 2-12 Simulador de vuelo 6 DOF de Lufthansa

El simulador de vuelo para entreno de la tripulación de la empresa Lufthansa (Figura 2-11) permite el movimiento en los tres ejes del espacio (X, Y, Z) y el giro en otros tres (dirección (*yaw*), elevación (*pitch*) y ángulo de alabeo (*roll*)). Además, puede llegar a mover hasta 15 toneladas de peso, distribuidos en sus 6 actuadores.



Figura 2-13 Simulador de conducción NORD Drivesystem 2015

También se ha desarrollado simuladores de uso doméstico y entretenimiento, como el presentado por la empresa Nord Drivesystem en 2015 (Figura 2-12). Un simulador 6 DOF construido sobre un hexápodo, que puede ser utilizado por aficionados y profesionales por igual.

### 2.5.4 Medicina

Otro gran campo de aplicación de máquinas creadas sobre plataformas Stewart-Gough es la medicina. Se han construido asistentes a la cirugía basados en hexápodos y robots delta, como máquinas específicas diseñadas para rehabilitación o como actuadores a distancia. El campo de la robótica y la medicina parece no tener límites y cada día se desarrollan nuevos artilugios en este campo.

Un uso curioso de la plataforma Stewart es el simulador de marcha, pensado para la rehabilitación de pacientes con discapacidades motrices (Figura 2-13) [12].



Figura 2-14 Simulador de marcha (Fuente: José Luís Zarate)

## 2.6 Proyectos a pequeña escala

Es importante hacer una mención a los proyectos de fin de grado, doctorado, master,...etc. y a los proyectos DIY<sup>2</sup> basados en plataformas Stewart-Gough por una sencilla razón: se han desarrollados muchos trabajos, DIY o profesionales, que implementan una solución de este tipo. Hay que añadir que la plataforma Stewart-Gough que se plantea en este documento es más parecida a este tipo de proyectos que a los robots industriales, y de los que ha tomado algunas de sus ideas.

Un trabajo muy interesante es el desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid, donde consiguieron que un robot articulado tipo delta jugase a tenis de mesa [3]. La utilización de cadenas cinemáticas de dos barras en lugar de actuadores lineales acerca más a este robot de solo 3 brazos a la plataforma Stewart aquí descrita.



Figura 2-15 Robot RoboTENNIS (Fuente: [www.upm.es](http://www.upm.es))

La utilización de servomotores en lugar de actuadores lineales está ampliamente extendida dentro de los trabajos de DIY, con lo que muchas de las soluciones matemáticas a la cinemática de la plataforma han sido replanteadas para estos actuadores. Como ejemplo de la utilización de servomotores en plataformas Stewart-Gough creada como proyecto final de carrera en la Universidad Politécnica Salesiana (Figura 2-15) [13] o la plataforma “MiniStew” (Figura 2-16), cuyo diseño inspiró a la plataforma que se describe en este trabajo.

---

<sup>2</sup> DIY: Abreviación de “Do It Yourself”, en español, “Hágalo Usted Mismo”. Es la práctica de la fabricación o reparación de cosas por uno mismo, de modo que se ahorra dinero, se entretiene y se aprende al mismo tiempo

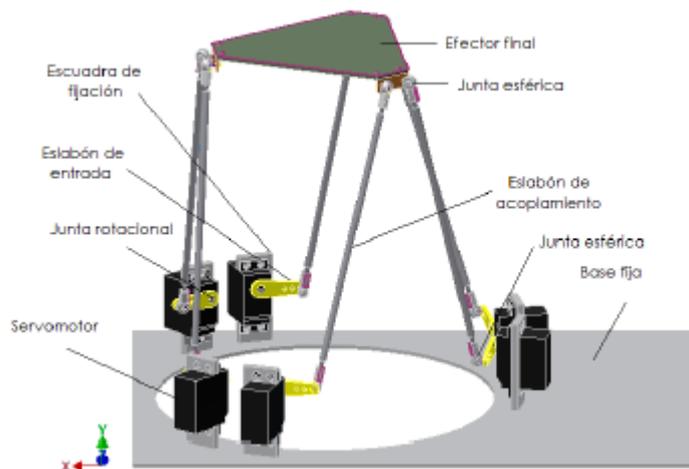


Figura 2-16 Plataforma Stewart de N. Gonzales Álvarez y E. Reinoso Mendoza

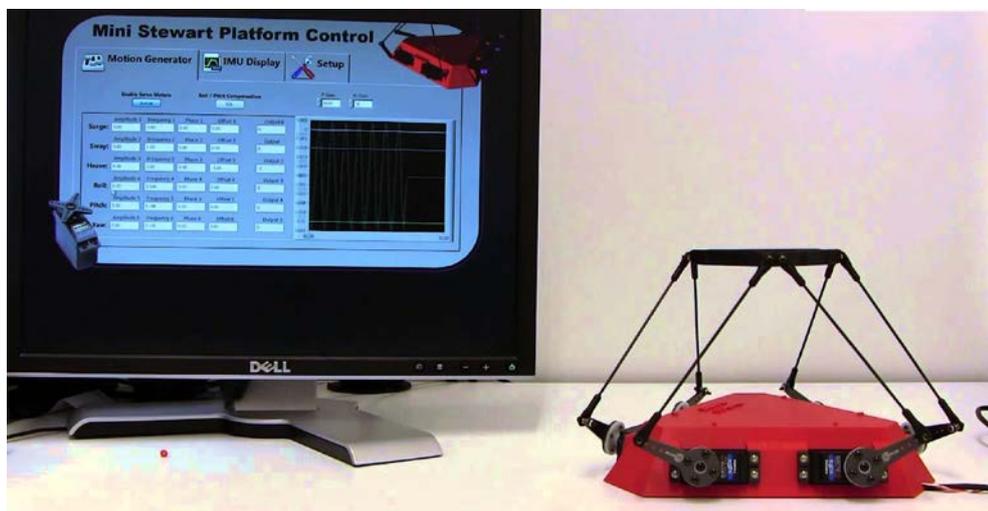


Figura 2-17 "MiniStew" (Fuente: [www.youtube.com](http://www.youtube.com))

También es necesario comentar que gran parte de estos proyectos (incluido el presente) son posibles gracias a la utilización de plataformas electrónicas de código abierto como Arduino. La utilización de esta plataforma permite el control de los elementos electrónicos del robot y la comunicación con el ordenador de manera sencilla y eficaz.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

*“Dame seis horas para talar un árbol y dedicare las primeras cuatro a afilar un hacha”*  
(Abraham Lincoln).

### 3.1 Introducción

La filosofía que se ha llevado a cabo en la realización de este proyecto se puede resumir con la cita anterior. Se ha tratado siempre de presentar soluciones sencillas pero de base sólida que permiten un posterior desarrollo y mantengan la principal cualidad que debe tener cualquier modelo, que sean escalables. Si bien el presente proyecto se plantea como el diseño y construcción de una plataforma Stewart-Gough de pequeñas dimensiones, no deja de tener presente su posible uso en nuevos proyectos que requieran unas plataformas de mayor tamaño.

La construcción de esta plataforma Stewart se lleva a cabo en consonancia con los requerimientos iniciales, que entre otros, incluye el desarrollo de una plataforma 6 DOF de costo reducido y que nos hará decantarnos por uno u otros elementos de construcción.

#### 3.1.1 Planeamiento

La necesidad de construir una plataforma de costo reducido obliga a elegir un sistema de actuadores económico. Los dos sistemas motores más extendidos en este tipo de robot son los actuadores lineales y los servomotores, siendo los segundos del orden de veinte veces<sup>3</sup> más económicos que los primeros.

Al no ser un requerimiento inicial la carga mínima de trabajo de la plataforma ni el volumen del espacio de trabajo, la ventaja económica que supone la elección de servomotores frente a actuadores lineales es abrumadora, más se considera el precio multiplicado por seis actuadores.

Para controlar dicho motores se opta por una plataforma electrónica versátil y de fácil implementación. Se escoge una placa Arduino® por su facilidad de uso y completa integración con los actuadores y el PC, frente a otra opciones como Raspberry-Pi® o la implementación de una placa de diseño propio.

---

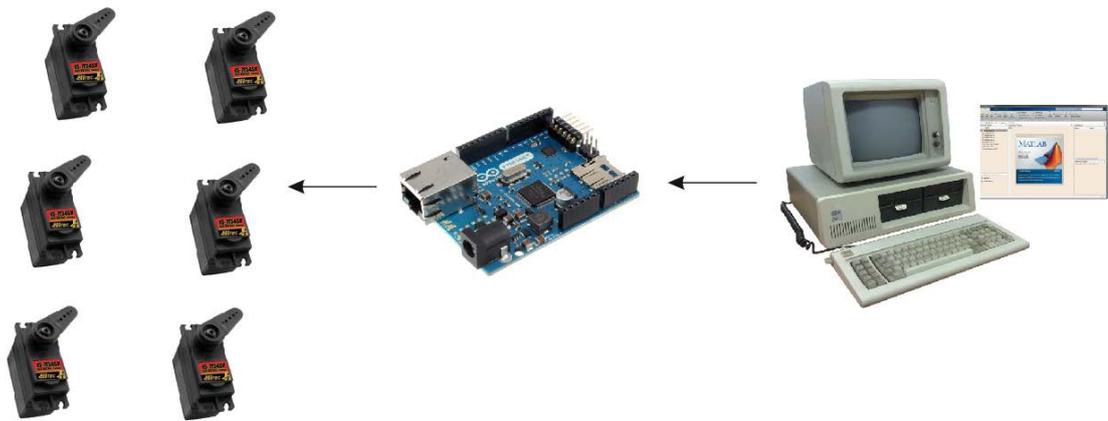
<sup>3</sup> Fuente de los datos comparados: <http://www.rs-online.com>

Para controlar el movimiento los movimientos de la plataforma, se piensa en el lenguaje de programación MATLAB por su versatilidad y potencial de uso.

La elección de servomotores impone, a priori, el diseño de una plataforma de pequeñas dimensiones. Lejos de suponer un problema, permite la utilización de nuevos sistemas de fabricación de bajo presupuesto y de prototipado rápido como es la impresión en 3 dimensiones.

La utilización de una impresora 3D limita el tamaño de las piezas a imprimir, pero permite a su vez el diseño y fabricación de complejas piezas.

La última decisión es el tipo de diseño a implementar. Para evitar los problemas que surgen de compartir puntos de unión [3] se selecciona el tipo de plataforma 6 a 6.



**Figura 3-1** Esquema de la solución planteada

Una vez establecido el punto de partida, se procede al desarrollo del proyecto.

### 3.1.2 Desarrollo del proyecto

La construcción de esta plataforma, su diseño ulterior y el análisis y pruebas de la maquina describe por completo al trabajo en sí. La forma de estructurar el proyecto es la siguiente:

1. Modelado y parametrización de una plataforma Stewart-Gough 6DOF
2. Diseño preliminar del hardware
3. Diseño detallado del hardware
4. Diseño del software de la plataforma
5. Diseño del software del computador
6. Descripción del proceso de fabricación
7. Análisis y simulación de la plataforma

### 3.1.3 Software utilizado

Dado el amplio abanico de campos que este proyecto aborda, es necesario el uso de varios programas informáticos, cada software especializado en un determinado campo.

#### 3.1.3.1 MathWorks MATLAB® R2013a

MathWorks MATLAB® R2013a se define a sí mismo como “*el lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo*”. Se enfoca en el desarrollo de cálculo técnico, pero su potencial es enorme. Permite utilizar funciones matemáticas para resolver problemas científicos y de ingeniería, analizar datos a gran escala, programar y desarrollar algoritmos y desarrollar aplicaciones. Hay que añadir que permite el uso de pequeñas aplicaciones integradas o APPs que convierten a este programa en una herramienta sumamente versátil.

El presente proyecto utiliza MATLAB® R2013a para la creación del modelo matemático y a su análisis posterior, y como lenguaje de programación para controlar la plataforma Stewart.

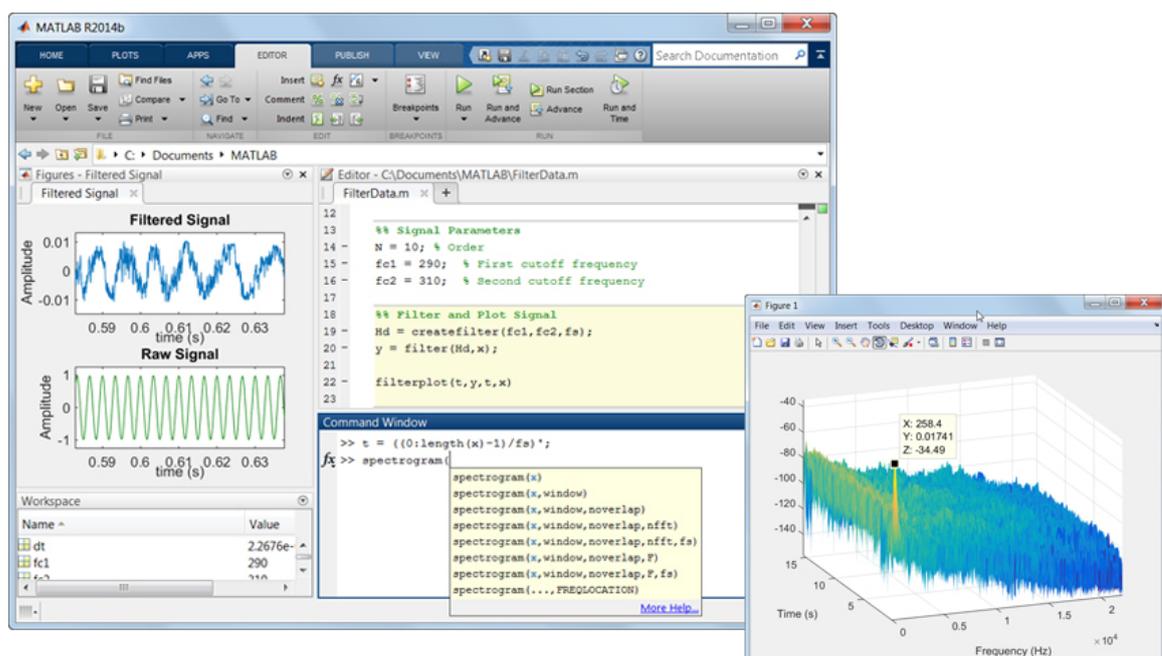


Figura 3-2 MathWorks MATLAB (Fuente: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com))

### 3.1.3.2 Autodesk® Inventor Professional 2016

Para el diseño de la plataforma y su modelado en CAD se utiliza el software Autodesk® Inventor Professional 2016. La suite que ofrece Autodesk para modelizado de mecanizados incluye también AutoCAD Mechanical. Las dos herramientas forman una buena combinación para enfrentarse al *Digital Prototyping*.

Entre las otras funciones, Inventor proporciona un medio para el diseño y modelado de elementos CAD y sus posterior análisis FEM. Permite también la creación de pequeñas animaciones, su posterior exportación a MathWorks SIMULINK® y la impresión en 3D entre otras funciones.

Autodesk® ofrece soporte a estudiantes y a universidades, lo que permite el uso de software calidad profesional sin coste alguno.

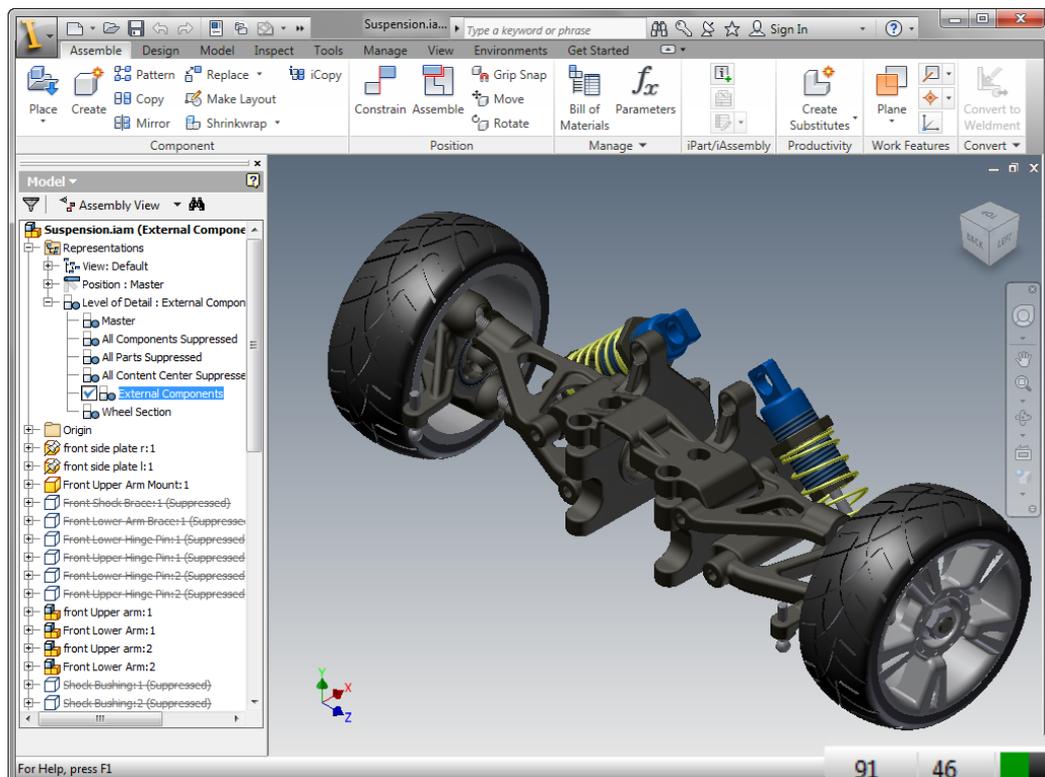


Figura 3-3 Captura de Autodesk Inventor

### 3.1.3.3 Microsoft® Visual Studio 2013 y Plugin Visual Micro

El software Microsoft® Visual Studio 2013 es un entorno de programación (IDE) extensible y gratuito que permite crear modernas aplicaciones para Windows, Android e iOS. El uso del *plugin* gratuito Visual Micro para las versiones posteriores a 2012 permite su utilización como IDE para plataformas como Arduino® o programación basada en Wiring.

Se ha optado por esta interfaz al ser gratuita y más completa que la propia IDE de Arduino®.

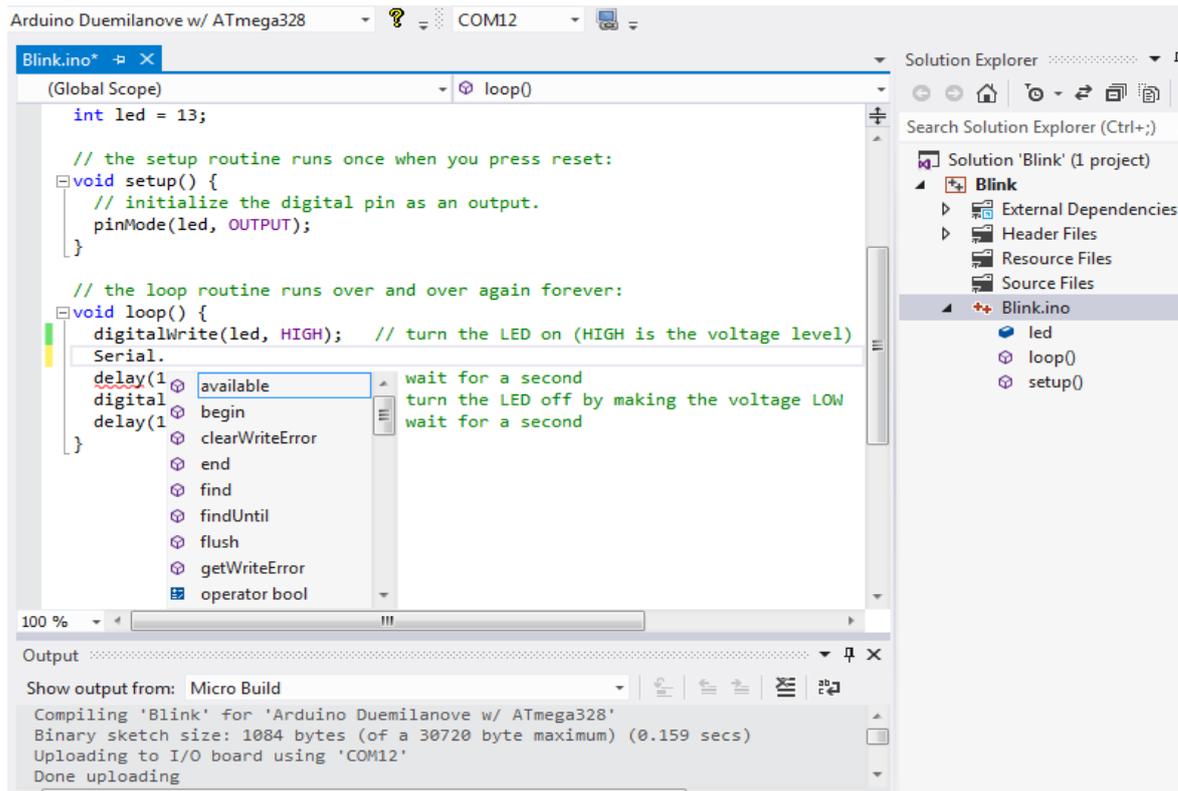


Figura 3-4 IDE Microsoft Visual Studio 2013 + plugin Visual Micro

### 3.2 Modelado

La utilización de servomotores en lugar de actuadores lineales implica el replanteamiento de las cadenas cinemáticas de esta plataforma Stewart-Gough. Mientras que la plataforma de Gough trabaja con barras de longitud variable que modifican su longitud separando la base del efector, la plataforma accionada mediante servos trabaja con dos barras de longitud fija unidas entre sí, consiguiendo la posición de los nodos del efector mediante la rotación de una de sus barras.

Esta diferencia transforma la solución del problema cinemático de incremento de longitud a incremento de ángulos de arco. Además, para ser completamente precisos a la hora de plantear el problema, la cadena de dos barras que une el eje del servo con el nudo del efector se desplaza en las 3 dimensiones del espacio.

Por otro lado, al tratarse la plataforma Stewart de un robot paralelo, la resolución del modelo cinemático suele hacerse por el método de la cinemática inversa en lugar de la resolución directa del problema. La resolución por medio de la cinemática inversa implica enfrentarse al problema conociendo la posición del efector, esto es, obtener los puntos de anclaje al efector para calcular el resto de parámetros.

Es interesante hacer notar las 64 posibles soluciones posibles para ubicar el efector al haber 2 soluciones por cada servo. Para obtener la solución más acertada, se discrimina la solución más favorable de cada servo.

### 3.2.1 Método de resolución

La resolución mediante la obtención de la cinemática inversa implica la obtención de la posición final del efector y con ella la resolución de las cadenas cinemáticas del robot. Modelando cada elemento por separado se obtiene lo siguiente:

- Efector final: modelado como los diferentes puntos de unión de las articulaciones del efector. Los puntos se encuentran en el mismo plano y describen la posición del propio efector. Rotando y desplazando este plano mediante unos valores iniciales de ubicación y rotación se obtiene el resto de parámetros.
- Brazos: Se modelan como barras de longitud fija ancladas a los nudos del efector mediante uniones de 3 grados de libertad que permiten su giro en todos los sentidos. La posición del otro extremo del brazo puede alcanzar los lugares contenidos en la superficie de una esfera centrada en el nudo del efector.
- Brazo actuador del servo o antebrazos: este brazo actuador se modeliza como la segunda barra, cuyos extremos son la varilla anterior y el eje del servo. Se encuentra unida a la varilla mediante una articulación que permite 2 grados de libertad, y al servo mediante una articulación que le permite solo la rotación alrededor de su eje. Este último anclaje obliga al brazo actuador a desplazarse en un plano. Las posibles ubicaciones de la articulación 2 DOF se pueden describir como una circunferencia centrada en el eje del servo dentro de un plano determinado, o como la intersección de una esfera de radio igual a la longitud del actuador y un plano que pase por su centro.

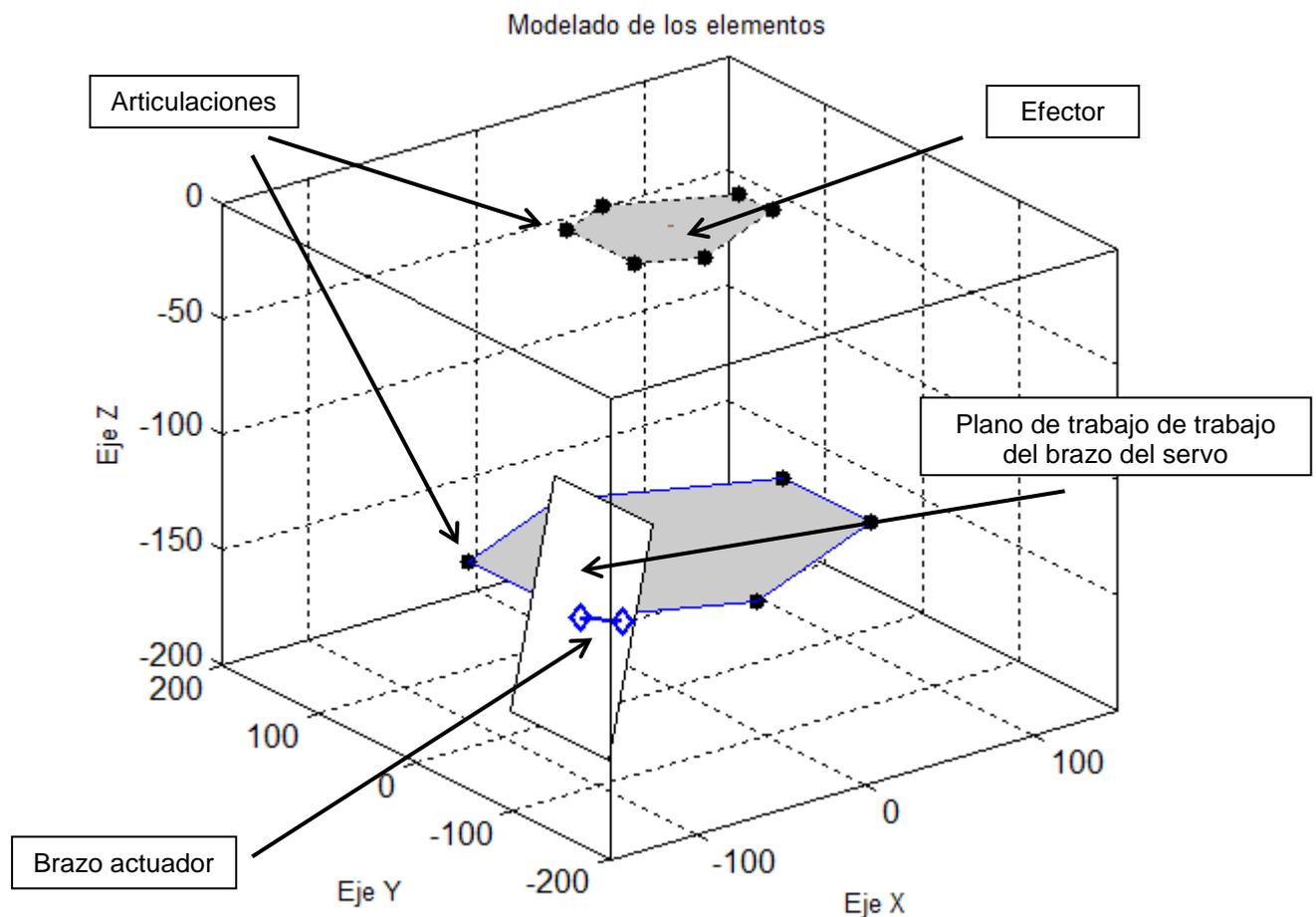
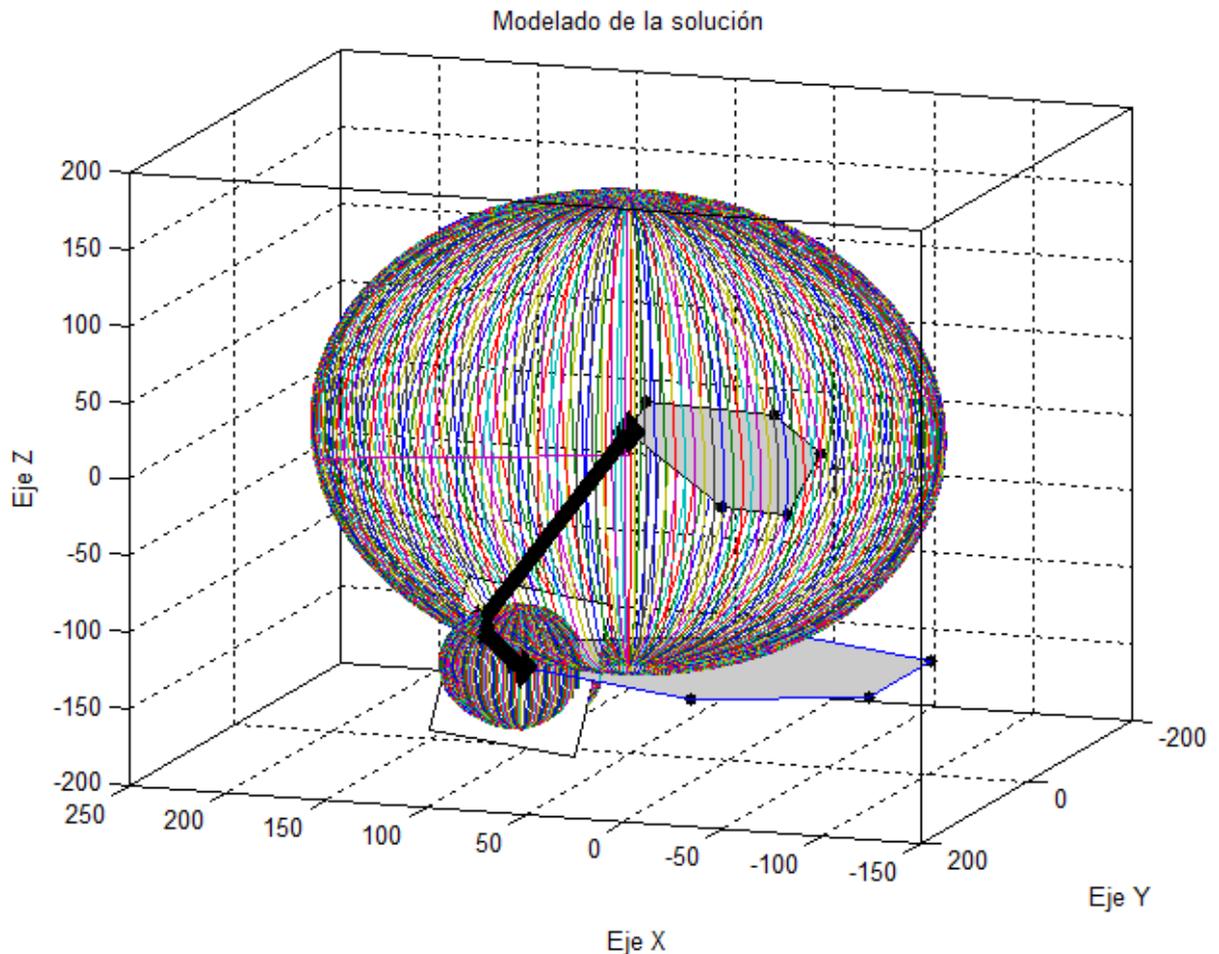


Figura 3-5: Modelado simple de elementos

La obtención final de los ángulos de giro de cada servo se obtiene con la resolución del problema que se plantea de la siguiente manera:

1. Obtención de la nueva posición del efector tras aplicar los cambios necesarios y conseguir la posición y dirección deseada.
2. Resolución del problema de intersección de dos esferas y un plano, correspondiente a la varilla, al brazo actuador y al plano de trabajo respectivamente.
3. Obtención la posición del brazo actuador como un giro referenciada a una posición concreta.



**Figura 3-6: Modelado de la solución**

Como se observa en la Figura 3-5, la intersección del plano y las dos esferas nos devolverá el estado del actuador, en este caso, el brazo del servomotor. Fácilmente se observa que existen dos soluciones posibles al problema planteado.

Se hace patente la necesidad utilizar herramientas matemáticas que solucionen el problema de la rotación de los elementos o el cambio de base. La utilización de cuaterniones [14] para el describir los giros y direcciones es usada por alguno autores de otros trabajos, sin embargo, en este proyecto se opta por la utilización de matrices de rotación y translación por su sencillez y versatilidad.

### 3.2.2 Resolución matemática

La obtención de la cinemática inversa de un robot paralelo consiste en el cálculo de la posición de los actuadores en base a la ubicación de la posición final del robot de la forma:

$$f(x_f, y_f, z_f, \varphi_f, \sigma_f, \theta_f) = (q_1, \dots, q_n) \quad (3-1)$$

En primer lugar se procede a la obtención de la posición final del efector. Para ello se describe la posición de cada articulación del efector mediante un vector cuyo origen de coordenadas el centro del efector final:

$$q_i = (q_{xi}, q_{yi}, q_{zi}) \quad (3-2)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

Ubicar el plano del efector en el mismo plano donde trabajará elimina posibles rotaciones para llegar a él.

Las posiciones de las 6 articulaciones se pueden contener dentro de una matriz de 6 por 3, quedando esta de la forma:

$$Q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{x1} & \dots & q_{z1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{x6} & \dots & q_{z6} \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

Esta matriz almacena la posición de los 6 nudos del efector. El cálculo de la cinemática inversa utiliza los parámetros de la posición final del efector para obtener la posición de sus articulaciones. Con estos parámetros previamente introducidos se calculan la posición de los nuevos vectores de posición.

Para realizar el cambio de base se utiliza las matrices de cambio de base. Con ellas y tres ángulos de Euler se puede alcanzar cualquier dirección del espacio tridimensional [15]. Para una rotación sobre el eje Z:

$$ROT(x, y, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

Del mismo modo las matrices de rotación en los ejes X e Y:

$$ROT(x, z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

$$ROT(y, z, \sigma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\sigma) & \sin(\sigma) \\ 0 & -\sin(\sigma) & \cos(\sigma) \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

Por simplicidad denotaremos:

$$R_z = ROT(x, y, \varphi)$$

$$R_y = ROT(x, z, \theta) \quad (3-7)$$

$$R_x = ROT(y, z, \sigma)$$

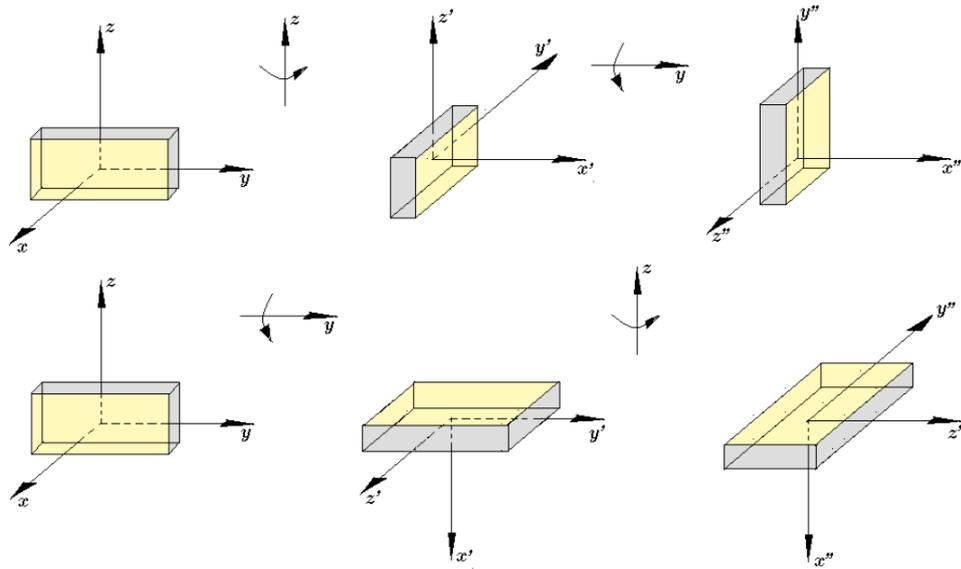
Para concatenar giros se puede multiplicar las matrices entre ellas, obteniendo una matriz de rotación en 3 ejes.

$$R_{zyx} = R_z \cdot R_y \cdot R_x \quad (3-8)$$

Para representar la matriz se sustituye  $\cos()$  y  $\sin()$  por  $c()$  y  $s()$  respectivamente:

$$R_{zyx} = \begin{pmatrix} c(\varphi)c(\theta) & c(\varphi)c(\theta)s(\sigma) - c(\sigma)s(\varphi) & s(\varphi)s(\sigma) + c(\varphi)c(\sigma)s(\theta) \\ c(\theta)s(\theta) & c(\varphi)c(\sigma) + s(\varphi)s(\theta)s(\sigma) & c(\varphi)s(\varphi)s(\theta) - c(\varphi)s(\sigma) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\sigma) & c(\theta)c(\sigma) \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

Se ha de tener presente que esta multiplicación no es conmutativa y el orden en el que se aplican los giros influye en la posición final obtenida (Figura 3-7).



**Figura 3-7 Propiedad no conmutativa de los giros**

La posición de las articulaciones del efector rotado se obtiene al multiplicar la matriz de las articulaciones (3-3) con la nueva matriz de rotación (3-9).

$$Q' = Q \cdot R_{zyx} \tag{3-10}$$

La translación a la posición final del efector se consigue con la suma del vector de posición final a la matriz.

$$t = (x, y, z) \tag{3-11}$$

$$q_{fi} = q'_i + t \tag{3-12}$$

La fórmula (3-12) consigue el vector de la posición final de una articulación. Para obtener la matriz con la posición final de las 6 articulaciones se utiliza la siguiente técnica:

$$T = \begin{pmatrix} x & y & z \\ x & y & z \end{pmatrix} \tag{3-13}$$

$$Q_f = Q' + T \tag{3-14}$$

La matriz (3-14) contiene los vectores de las articulaciones del efector en la posición y con el giro definido. Posteriormente, estos puntos del espacio actuarán como centros de la una esfera. En la Figura 3-8 se representa los cambios realizados en el plano del efector.

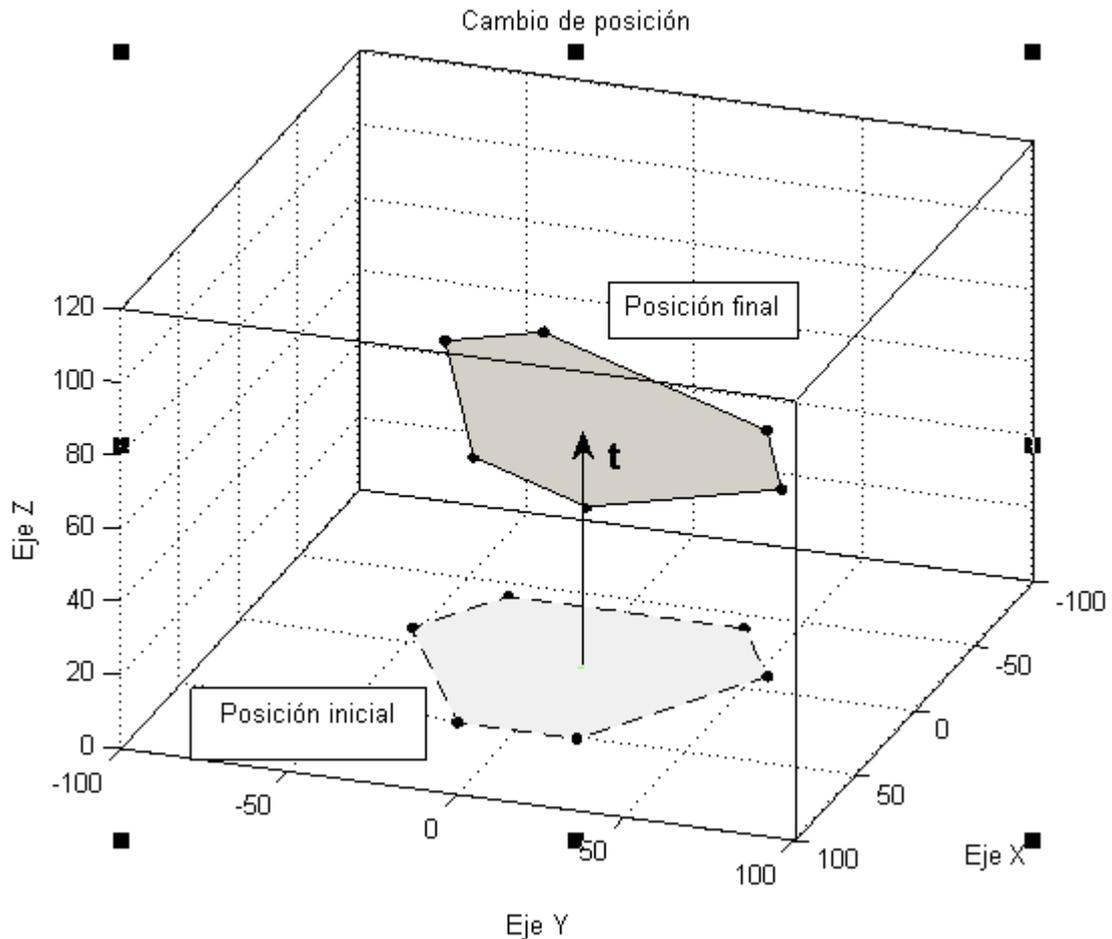


Figura 3-8 Modelado de la posición final del efector

El siguiente punto de en la resolución del problema consiste en la obtención del corte entre las superficies de las dos esferas y el plano. Plantear la solución como intersección mediante las ecuaciones paramétricas en tres dimensiones de las tres superficies es un problema complejo, por ello se opta por la utilización de técnicas alternativas en la resolución. La estrategia utilizada consiste en trasladar el problema de un espacio de tres dimensiones a uno de dos, utilizando para ello cambios de base, para luego resolver el problema como corte de dos circunferencias.

Sea entonces el vector  $\mathbf{o}$  homologa al vector  $\mathbf{q}$  de la ecuación (3-2) con las articulaciones centradas en los servos y el mismo punto de referencia utilizado las trasladar el efector:

$$\mathbf{o}_i = (o_{xi}, o_{yi}, o_{zi}) \quad (3-15)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

Si se quiere conseguir un cambio de base del plano de trabajo del brazo del servo desde las 3 dimensiones a trabajar solo en 2 dimensiones, el orden necesario será mediante una traslación de este plano al centro de referencia y después, las rotaciones necesarias para orientar el plano (Figura 3-7), de la misma manera que se hizo con el plano anterior en (3-10) y (3-14).

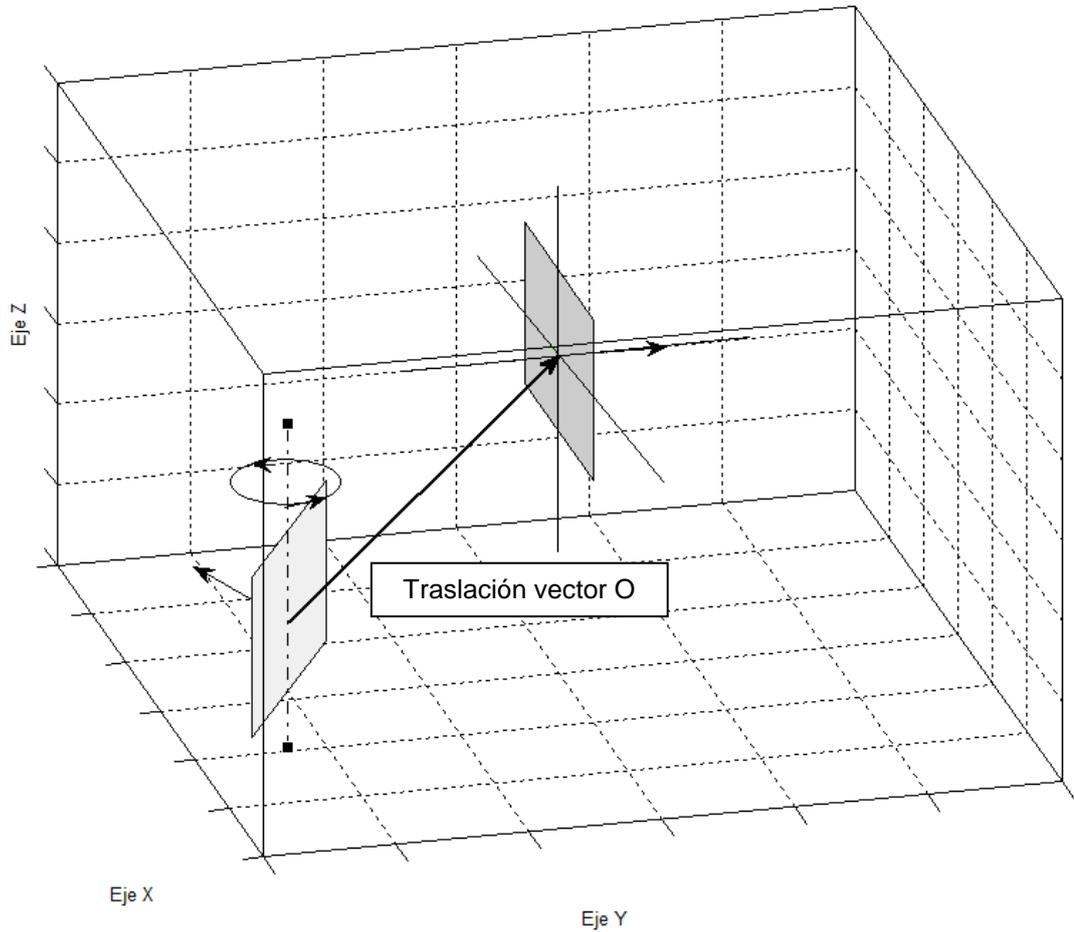


Figura 3-9 Transformación 3D a 2D

Ahora bien, la posición relativa entre las articulaciones del servo y del efector debe de permanecer inalterada sea cual sea el cambio de base propuesto. Si estas rotaciones y traslaciones las aplicamos también a las articulaciones del efector, conseguimos reubicar la articulación del efector y situar la articulación del servo en el origen de coordenadas.

$$\mathbf{q}''_i = \mathbf{q}_{fi} + \mathbf{o}_i \quad (3-16)$$

$$\mathbf{q}'''_i = \mathbf{q}''_i \cdot ROT(x, y, \varphi_{s_i}) \cdot ROT(x, z, \theta_{s_i}) \cdot ROT(y, z, \sigma_{s_i}) \quad (3-17)$$

Las rotaciones del plano se realizan de según la inclinación y el sentido final del plano de trabajo de cada uno de los servos. Como se explicó al comienzo del apartado, la orientación de cada plano se puede describir con 3 ángulos de Euler ( $\varphi, \theta, \sigma$ ) que depende del diseño final y son usados en la ecuación (3-17). Estos tres ángulos pueden tomar como referencia un plano orientado en cualquier dirección (por ejemplo en Y, como en la Figura 3-7).

La posición de cada articulación del efector  $q'''_i$  obtenida tras los giros (3-17) se convierte en centro de una esfera de radio de longitud igual al mayor de los brazos de la estructura.

Toda esfera una propiedad que será de gran utilidad en la resolución del problema final: La intersección de cualquier plano que corta una esfera es una circunferencia (Figura 3-8).

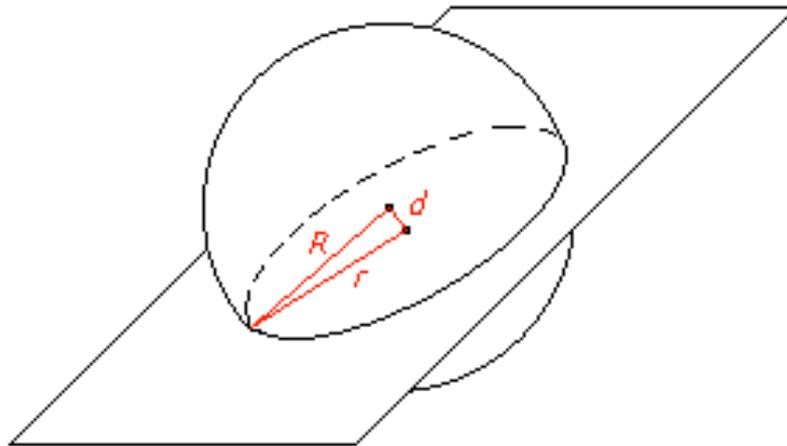


Figura 3-10 Intersección entre un plano y una circunferencia

Si el plano que corta la circunferencia se iguala al plano de trabajo de los servos tras el cambio de base, obtenemos un plano que corta la circunferencia y que se orienta sobre dos ejes ortogonales. Dicho de otro modo, la intersección entre una esfera y el plano que se buscaba al principio del problema es una circunferencia de radio R cuyo espacio de trabajo es un subespacio de 2 dimensiones. Otra ventaja es que la obtención del centro de la esfera y el centro es inmediata:

Siendo el centro de la esfera:

$$q'''_i = (q'''_{xi}, q'''_{yi}, q'''_{zi}) \quad (3-18)$$

Si por ejemplo, se ha escogido un plano de orientación de referencia X, el centro de la circunferencia será:

$$Rc_{3D_i} = (\emptyset, q'''_{yi}, q'''_{zi}) \quad (3-19)$$

$$Rc_i = (q'''_{yi}, q'''_{zi}) \quad (3-20)$$

Utilizando el teorema de Pitágoras y la distancia se obtiene el valor del radio de la circunferencia:

$$Rc_i = \sqrt{R^2 - q_{zi}^2} \quad (3-21)$$

Por simplicidad utilizaremos:

$$\mathbf{Rc} = (Rc_{iy}, Rc_{iz}) \quad (3-22)$$

Tenemos ahora dos circunferencias de radio definido y posición conocida, que se describen mediante la siguiente ecuación en dos dimensiones:

$$Rc^2 = (Y - Rc_y)^2 + (Z - Rc_z)^2 \quad (3-23)$$

$$rc^2 = (Y)^2 + (Z)^2 \quad (3-24)$$

Las ecuaciones (3-23) y (3-24) forman un sistema de dos incógnitas que devuelven dos puntos de corte se resuelven:

$$Sy_1 = \frac{Rc_{iz} \sqrt{(-R^2 + 2Rr - r^2 + Rc_{iy}^2 + Rc_{iz}^2) \cdot (R^2 + 2Rr + r^2 - Rc_{iy}^2 - Rc_{iz}^2)}}{2 \cdot (Rc_{iy}^2 + Rc_{iz}^2)} - \frac{R^2 \cdot Rc_{iy} + r^2 \cdot Rc_{iy} + Rc_{iy} \cdot Rc_{iz}^2 + Rc_{iy}^3}{2 \cdot (Rc_{iy}^2 + Rc_{iz}^2)} \quad (3-25)$$

$$Sy_2 = - \frac{Rc_{iz} \sqrt{(-R^2 + 2Rr - r^2 + Rc_{iy}^2 + Rc_{iz}^2) \cdot (R^2 + 2Rr + r^2 - Rc_{iy}^2 - Rc_{iz}^2)}}{2 \cdot (Rc_{iy}^2 + Rc_{iz}^2)} + \frac{R^2 \cdot Rc_{iy} + r^2 \cdot Rc_{iy} + Rc_{iy} \cdot Rc_{iz}^2 + Rc_{iy}^3}{2 \cdot (Rc_{iy}^2 + Rc_{iz}^2)} \quad (3-26)$$

$$Sz_1 = \sqrt{r^2 - x_1^2} - \sqrt{R^2 - (x_1 - Rc_{iy})^2} + Rc_{iz} \quad (3-27)$$

$$Sz_2 = \sqrt{r^2 - x_2^2} - \sqrt{R^2 - (x_2 - Rc_{iy})^2} + Rc_{iz} \quad (3-28)$$

Utilizándose la notación NED<sup>4</sup>, se toma como ángulo de referencia el eje Z y se calcula el ángulo de apertura:

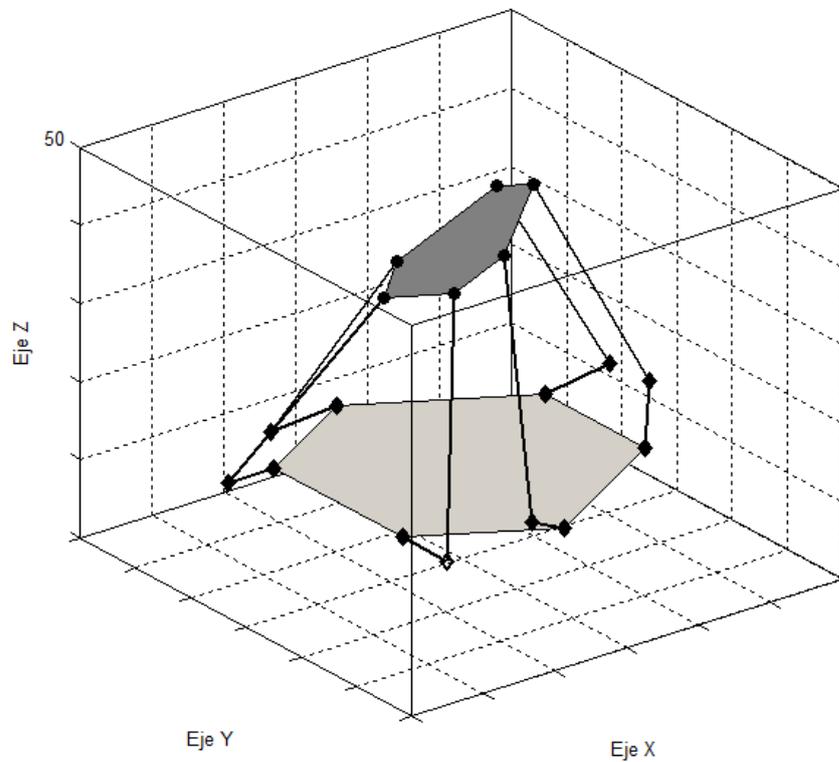
---

<sup>4</sup> Notación NED (North East Down): también llamada LTP (Local Tangent Plane), orienta un sistema de coordenadas tomando como referencia el Norte, el Este y Abajo.

$$\varphi_{i1} = \arctg\left(\frac{Sy_1}{Sz_1}\right) \quad (3-29)$$

$$\varphi_{i2} = \arctg\left(\frac{Sy_1}{Sz_2}\right) \quad (3-30)$$

Las soluciones obtenidas en (3-29) y (3-30) son los ángulos de apertura del servo  $i$ . Repitiendo los pasos para los 6 servos (desde la ecuación (3-22)) se consigue resolver el problema por completo.



**Figura 3-11 Modelado final de la Plataforma**

Utilizando este método de resolución se puede conseguir y comprobar un modelo matemáticos que nos permite simular y analizar la plataforma, ayudando en el diseño detallado de la misma.

### 3.3 Diseño del Hardware

El diseño de la presente plataforma Stewart-Gough se ha llevado a cabo en dos pasos bien diferenciados: en primer lugar, se ha estudiado la implementación de otras plataformas Stewart de estructura similar, así como otros robots paralelos de igual o menor número de grados de libertad. Comparando los resultados obtenidos en el desarrollo de cada una de ellas se ha optado elegir el mejor diseño y mejorarlo con lo aprendido de trabajos anteriores. En segundo lugar, tras el primer diseño se ha realizado un diseño minuciosamente detallado del robot.

#### 3.3.1 Diseño preliminar

La implementación de otros robots paralelos y plataformas Stewart aporta mucha información sobre los pros y los contras que tiene las diferentes estructuras propuestas en otros trabajos y máquinas. Conocer estos proyectos nos permite realizar un robot que aglutine los puntos fuertes y evite en mayor medida las debilidades conocidas.

El primer paso que se debe dar es el establecimiento de prioridades por orden de importancia. Esto permite elegir con criterio sobre las diversas soluciones y también sobre el método a llevar a cabo para avanzar en su desarrollo.

Se especifican con máxima prioridad dos de las propiedades y requerimientos iniciales que debe cumplir el modelo:

- Debe ser una plataforma del tipo 6 a 6 para evitar interferencias entre los brazos de la estructura.
- Debe ser utilizar servomotores y piezas impresas en 3D. Obliga, por tanto, a un diseño de dimensiones reducidas.

En el siguiente orden de prioridad establece las propiedades que se deben maximizar:

- Debe poseer una estructura estable: En cualquier caso la plataforma debe comportarse como un elemento sólido y fuerte, lejos de desequilibrios.
- Debe ser precisa y exacta: Es un requerimiento que se le supone a los robots paralelos por el diseño de su estructura.

Como última prioridad, aquellas propiedades que se debe mejorar, pero no a costa de sacrificar otras:

- Mayor espacio de trabajo: El volumen donde un efector puede desarrollar sus movimientos es relativamente pequeño comparado con otros tipos de robots. Por este motivo, se intentar conseguir un buen espacio de trabajo.
- Maximizar la carga útil que puede mover.
- Maximizar velocidad y aceleración.

Una vez planteados las especificaciones de la plataforma Stewart, se escoge el método de optimización. Existen dos formas de enfrentarse a este problema: Mediante la utilización de algoritmos genéticos [16] [9] y de optimización o diseñar el modelo y mejorar a posteriori. El primer método consiste en el diseño de un algoritmo capaz de evaluar un parámetro y obtener el mejor valor posible. Es un método sumamente eficaz e incluso necesario cuando se diseñan máquinas con una función determinada que exigen una máxima focalización en uno de sus parámetros. El segundo método consiste en un diseño preliminar y su posterior mejora mediante un proceso iterativo de análisis y ensayos.

La cantidad de parámetros variables que se deben plantear (distancia entre articulaciones del efector, distancia entre servos y el tamaño de los brazos y antebrazos) para optimizar la plataforma mediante algoritmos genéticos o mediante funciones de optimización supone un gran esfuerzo de cálculo que no asegura que los resultados obtenidos sean compatibles con los requisitos de tamaño. Hay que sumar a esto que aun teniendo el modelo matemático y la solución planteada, la optimización del espacio de trabajo o de precisión no es una cuestión fundamental, a diferencia del tamaño de la plataforma.

En su lugar, se opta realizar un boceto preliminar que cumplan las condiciones requeridas de tamaño y adaptar el modelo a las prioridades del diseño, realizando modificaciones en dirección a obtener mejores características.

El primer diseño se realiza teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La distancia entre servos debe ser pequeña para evitar construir una base de gran tamaño que provoquen problemas a posteriori.
- Existe una relación sobre la distribución de fuerzas y la diferencia de distancia de las articulaciones de los servos y del efector. A mayor diferencia, menor torque haría falta para desplazar la carga. Por otro lado, a mayor diferencia, menor espacio de trabajo y mayor precisión. Se ha buscado una solución de compromiso entre precisión y volumen de trabajo.
- Las articulaciones imponen serias restricciones al espacio de trabajo por sus límites de apertura.
- Las singularidades en la plataforma dentro del espacio de trabajo pueden reducirse con la instalación de los servomotores en diferentes planos de trabajo [16].

Se opta por un diseño de estructura piramidal que intenta solventar algunos de los problemas planteados y toma una posición de equilibrio entre espacio de trabajo y precisión. Se toma como referencia el proyecto “miniStew” (Figura 2-17) por la similitud a la idea original.

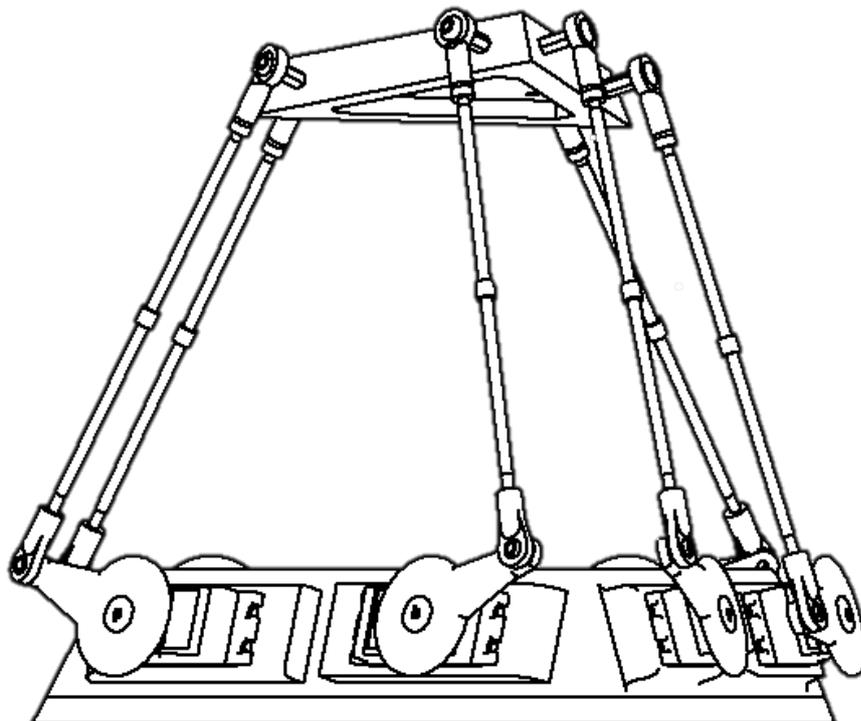


Figura 3-12 Diseño preliminar

### 3.3.2 Diseño detallado

El diseño detallado consiste en, una vez se tiene la idea general de proyecto, comenzar a definir cada parte integrante del mismo. El orden lógico es la selección de los elementos a utilizar, el rediseño de la estructura a partir de ellos y el ajuste fino de los elementos.

#### 3.3.2.1 Elección de elementos y materiales

La selección de los materiales que se han de utilizar, así como la elección de los demás elementos constructivos es, des del punto de vista de las especificaciones técnicas del robot, tan importante como el mismo proceso de diseño. En los siguientes puntos se expondrán los materiales elegidos para este fin.

##### 3.3.2.1.1 Material de impresión

Para la impresión se utilizará un material termoplástico estándar, el PLA<sup>5</sup>, ampliamente difundido en la impresión 3D bajo el proceso FDM. Sus propiedades mecánicas son lo suficientemente buenas para el uso que va a recibir en este proyecto.



Figura 3-13 Filamento de PLA para impresión 3D

Especificaciones Técnicas	
Densidad	1,25 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	3.5 GPa
Elongación a la rotura	6%
Módulo de flexión	4 GPa
Resistencia a la flexión	80 MPa
Temperatura de transición vítrea	60°C
Comienzo de fusión	160°C
Módulo de corte	2,4 GPa
Capacidad calorífica específica	1800 J/kg-K
Relación fuerza-peso	40 kN-m/kg
Resistencia a la tracción (UTS)	50 MPa
Conductividad térmica	0,13 W/m-K

Tabla 3-1 Especificaciones mecánicas del PLA (Fuente: [18])

<sup>5</sup> EL poliláctico (PLA o ácido poliláctico) es un polímero constituido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET).

### 3.3.2.1.2 Servomotores

La selección de los unos buenos actuadores influye mucho en las características finales de la plataforma. Tanto la velocidad como la aceleración del efector dependen casi en exclusiva de la velocidad de rotación del servo. Por otro lado, la máxima carga de trabajo que puede desplazar también depende en gran medida del torque del servo, siendo del orden de 4 a 6 veces superior al torque del servo por la longitud del brazo.

Es importante hacer notar la importancia que tiene instalar todos los servos iguales. Lejos de ser un asunto trivial, utilizar distintos tipos de servomotores obliga a solucionar nuevos problemas, o al menos, a tener en cuenta las distintas velocidades de trabajo y diferentes torques, convirtiendo las propiedades del espacio de trabajo en asimétricas.

Sabiendo de la importancia que tiene la elección de los servos, se opta por trabajar con servos de calidad media-alta como los TGY-S901D, de la casa Turnigy®.



Figura 3-14 TGY-S901D de la casa Turnigy

Especificaciones Técnicas	
<b>Modelo</b>	TGY-S901D
<b>Voltaje</b>	6.0V / 7.2V
<b>Velocidad operativa</b>	0.16sec.60° / 0.14sec.60°
<b>Torque:</b>	12.5kg.cm / 13kg.cm
<b>Tamaño:</b>	40.8X20.1X37.6mm
<b>Peso</b>	58g
<b>Motor</b>	Coreless Type
<b>Ball bearing</b>	2BB
<b>Engranaje</b>	Metal
<b>Conector</b>	JR Type

Tabla 3-2 Características técnicas del servo TGY-S901D

### 3.3.2.1.3 Rotulas y brazos

La selección de las rótulas y la longitud de los brazos se realiza según la oferta del mercado. Se escoge unas rótulas metálicas para el efector final y unas de plástico para el brazo del servo. En este caso, unas rótulas M3 y unas varillas de mando de 130 mm. El motivo es la disponibilidad de rótulas de rosca a izquierdas y a derechas.



**Figura 3-15 Varilla de mando de aluminio roscada M3**



**Figura 3-16 Rótula de plástico**



**Figura 3-17 Rótula de aluminio**

### 3.3.2.1.4 Selección de la placa controladora

La placa controladora es un Arduino UNO. Arduino es una plataforma de hardware libre que integra un controlador ATmega328. Su facilidad de uso lo convierte en una elección idónea si se quiere evitar la inmersión en la electrónica de la máquina. La placa UNO se puede considerar como la placa de entrada a la serie. En relación a las características necesarias, cumple sobradamente con los requerimientos de procesamiento, memoria y cantidad de conexión (puede controlar hasta 14 servos simultáneos).

Se escoge esta y no otra placa más pequeña por dos motivos: porque permite seguir desarrollando el software de la plataforma Stewart y sus conexiones de alimentación y conexión son accesibles y utilizan conectores comunes.

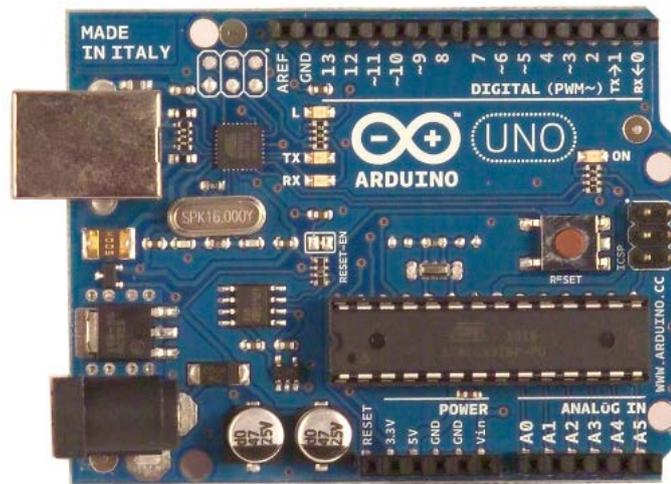


Figura 3-18 Arduino UNO

Especificaciones Técnicas	
Microcontrolador	ATmega328
IN Voltaje	6V
IN Voltaje recomendado	7-12V
IN Voltaje limite	6-20V
Pines I/O digitales	14 (6 con PWM)
Pines I analógicos	6
DC para I/O pines	40 mA
Memoria Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

Tabla 3-3 Características Arduino UNO

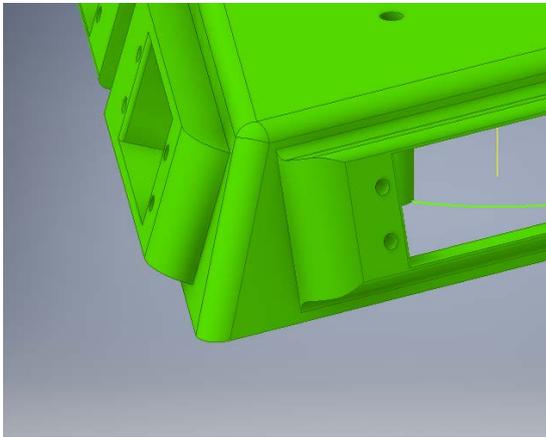
### 3.3.2.2 Particularidades del diseño

Partiendo del diseño anterior, se realizan los cambios necesarios para el ajuste de los nuevos elementos y conseguir las prestaciones requeridas.

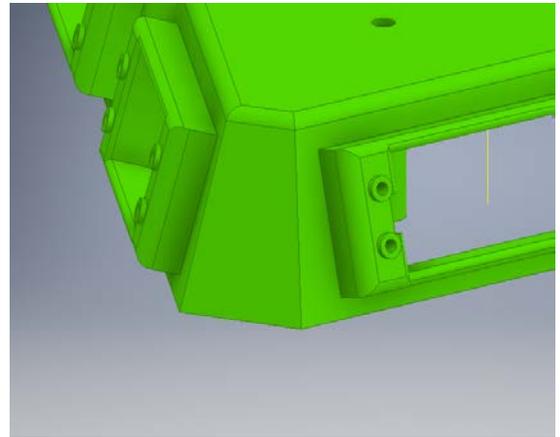
#### 3.3.2.2.1 Redimensionamiento de la base

El primer problema que surge en la realización del diseño es el ajuste de las piezas de la base. El tamaño de la base debe ser lo suficientemente pequeño como para poder ser impreso de una sola pieza. Se puede dividir la pieza general en varias, pero la pérdida de precisión en el ajuste desaconseja esta opción por esta vía.

Se escoge la opción de rediseño de la base, pasando de una forma triangular a un hexágono irregular, más complejo, pero que ocupa menos espacio y soluciona evita el problema de dividir la pieza.



**Figura 3-19** Esquinas antes



**Figura 3-20** Esquinas después

Este ajuste permite pasar de un triángulo de lado 230 mm a un hexágono cuyas esquinas más alejadas se encuentran a 200 mm. Se produce una reducción de tamaño del 13% sin afectar a los demás elementos.

El grosor de la pieza se intenta ajustar para ser lo más eficiente. Al estar los esfuerzos bien definidos en los anclajes de los servos, estos se refuerzan, lo que permite mantener un grosor de 2,25 mm de ancho, más que suficiente para soportar los esfuerzos de la plataforma.

#### 3.3.2.2.2 Ajuste de la ubicación de los servomotores

Un parámetro importante en para las prestaciones de la plataforma Stewart-Gough es la distancia de separación entre los servos. Recordemos que a mayor distancia de separación, mejor distribución de las cargas y aumento la precisión del efector. La optimización se consigue mediante el traslado lo más lejos posible del centro.

El principal problema surge al intentar aproximar dos servos a las esquinas. En las posiciones cercanas a las esquinas no existe espacio para dos servos. La solución pasa por “extraer” los servos del interior de la base. Para ello se crean salientes en la base que servirán para este propósito y además crearan una sólida estructura de anclaje.

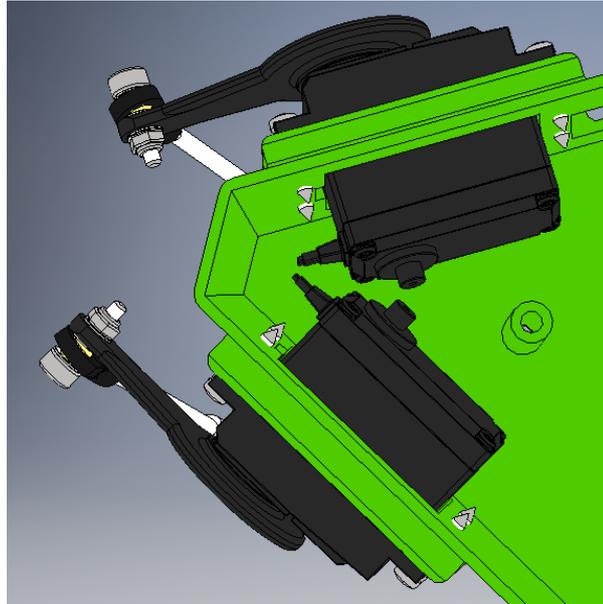


Figura 3-21 Distancia mínima entre dos servomotores

Para introducir cada servomotor en la base, se crean unas aberturas de 1 milímetro de margen y una pequeña muesca que permite la introducción del cable, haciendo más sencillo su ensamblaje. Para conseguir un ajuste preciso del servo se utiliza la filosofía Poka-Yoke<sup>6</sup> orientado la muesca del servo y creando unos salientes en su lugar de anclaje (Figura 3-20).

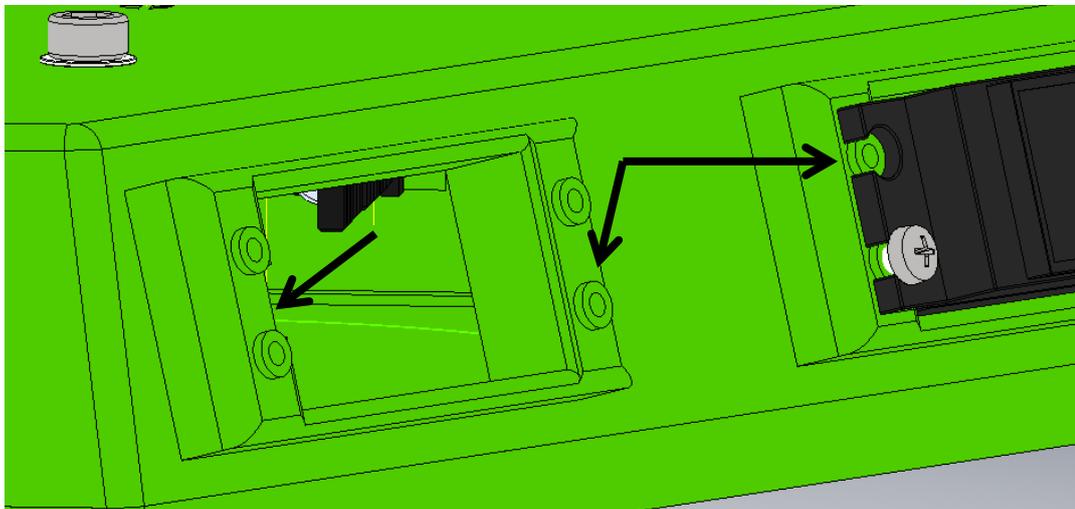


Figura 3-22 Anclaje de los servos

---

<sup>6</sup> Literalmente, *diseño a prueba de errores*: es una técnica de calidad que se aplica con el fin de evitar errores en la operación de un sistema

### 3.3.2.2.3 Ubicación de la placa Arduino UNO

Con objeto de mantener la electrónica del robot en la propia plataforma Stewart, la circuitería y la placa Arduino UNO se recogen dentro de la base. La electrónica se ancla dentro de la base mediante tornillos, en una posición que no molesta a los servos ni a la propia electrónica y permite la conexión de una fuente de alimentación externa y un cable USB.



Figura 3-23 Anclaje de la placa electrónica

### 3.3.2.2.4 Diseño del efector

Una pieza muy importante es el efector. Se plantea como una pieza rígida y fuerte, de poca masa y con capacidad de admitir nuevas piezas, como por ejemplo, el ajuste de una plataforma cuadrada de grandes dimensiones.

Su diseño ha sido pensado para continuar con la estructura piramidal de la plataforma (Figura 3-23). Esta forma de repartir cargas es especialmente buena en la utilización de 6 actuadores diferentes. También repercute su diseño en la relación en el ángulo máximo de inclinación de la plataforma y el volumen del espacio de trabajo. El ajuste del primer parámetro se pospondrá a la creación del brazo del servo mientras que el segundo queda supeditado a la optimización de la apertura de las rótulas.

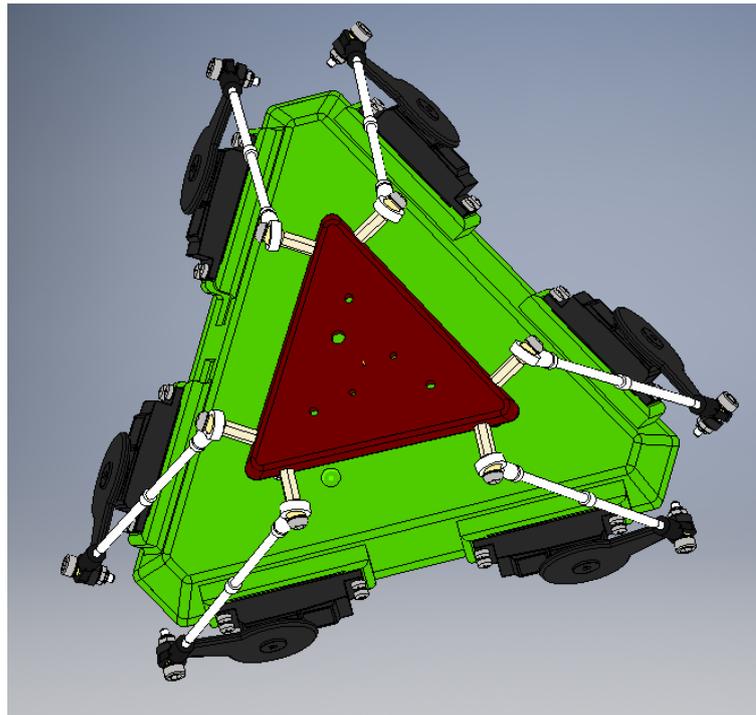


Figura 3-24 Estructura piramidal del diseño

El ángulo de inclinación de los servos afecta al diseño de la plataforma, que teniendo en cuenta el centro natural del espacio de trabajo [5] o *Home Position* (3.6.1) como punto de referencia, se ajusta el tamaño de la plataforma para conseguir que los brazos trabajen en planos paralelos a los servos.

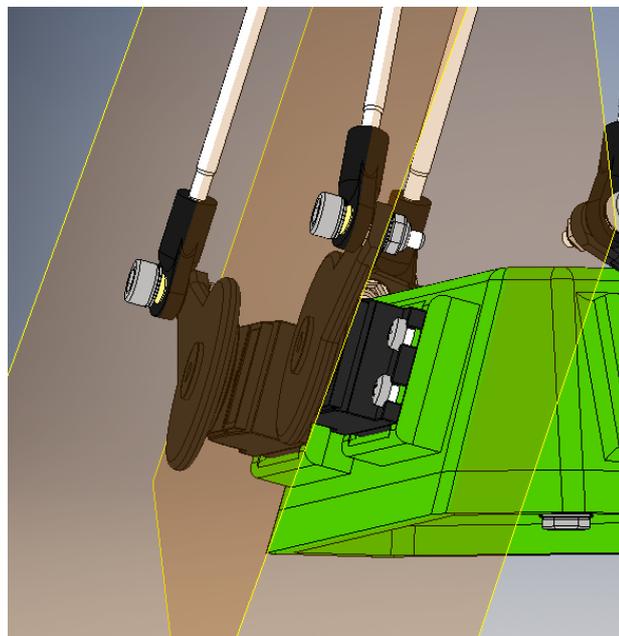
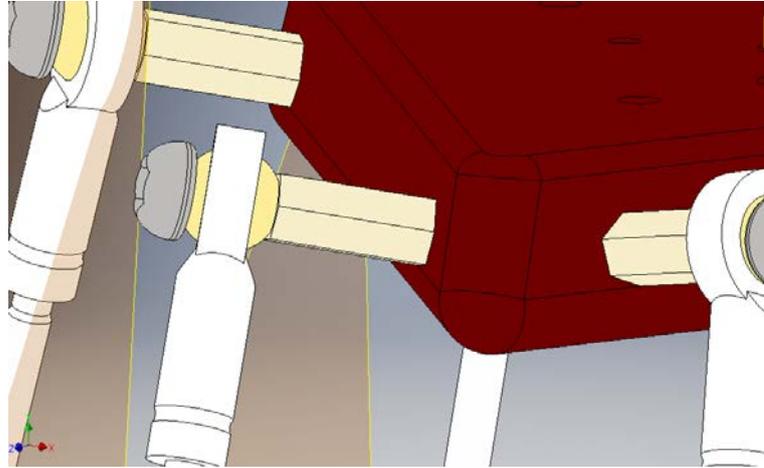


Figura 3-25 Servos y brazos trabajando en planos paralelos

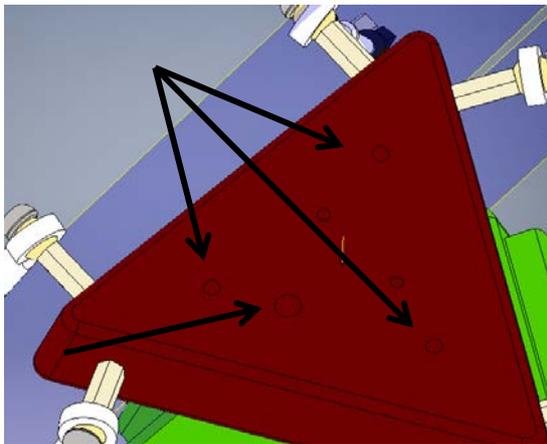
Un punto importante es el anclaje de la rótula al efector. Si se consigue que el eje de la rótula sea perpendicular al plano de trabajo del brazo, la rótula dispondrá de mayor margen de giro para modificar el estado del efector. Para ello se crea una inclinación en el lateral del efector diferente a la inclinación de la base.



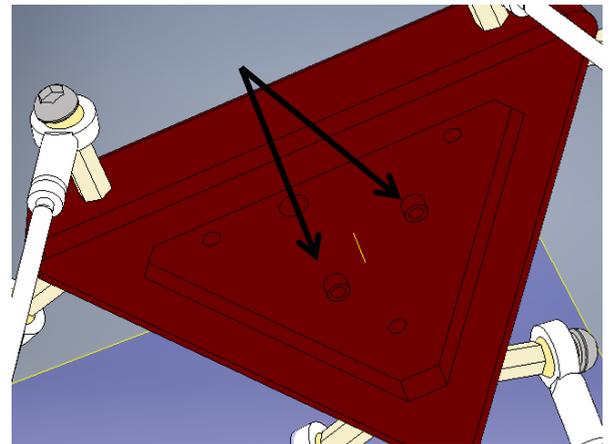
**Figura 3-26 Anclaje al efector inclinado**

La sujeción de las rotulas al efector se realiza mediante separadores para evitar que el mismo efector limite el movimiento ellas.

El efector cuenta con una serie de orificios. Tres oricios para anclar cualquier tipo de futuros instrumentos o plataformas, un orificio de gran tamaño para cableado, y dos orificios en la parte inferior pensados especialmente para la instalación de una unidad inercial, que puede aumentar en gran medida las prestaciones de este instrumento.



**Figura 3-27 Parte superior del efector**



**Figura 3-28 Parte inferior del efector**

### 3.3.2.2.5 Creación del nuevo brazo del servo

El servo TGY-S901D trae consigo un brazo de tipo circular y pequeñas dimensiones. Como se puede comprobar en el modelo matemático, unas dimensiones pequeñas del brazo del actuador proporciona un recorrido corto y preciso, obteniendo con ello una gran precisión de movimiento y una gran capacidad de carga, pero un limitado espacio de trabajo. Lejos de ser una pieza trivial, su longitud es uno de los parámetros más influyentes en el diseño de la plataforma.

Si consideramos el doble del radio como el máximo desplazamiento en un eje (Esto no es cierto si se considera que el servo no debe sobrepasar la base o tapa donde se encuentran los apoyos) y se considera fijo el centro del efector, se tiene que dependiendo de la longitud del brazo se consigue aumentar o disminuir el máximo grado de inclinación del efector. Se puede visualizar gráficamente en la Figura 3-22.

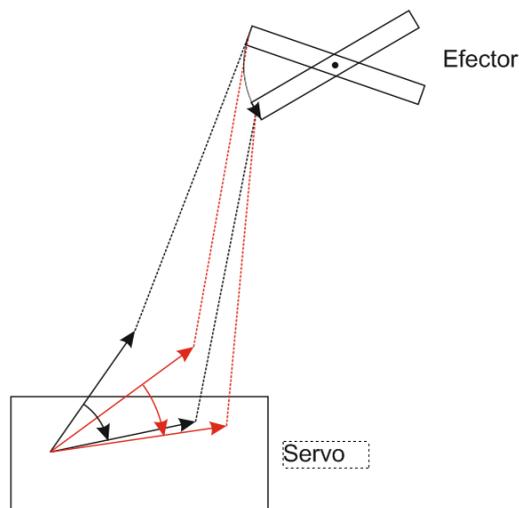


Figura 3-29 Como afecta la longitud del brazo o al ángulo de giro

Al estar limitado este valor por la máxima apertura de las rótulas, es una magnífica ocasión para optimizar la longitud del brazo del actuador. Se considera para ello el máximo ángulo de apertura que permite las rótulas ( $23,4^\circ$  a banda y banda en el caso de esta plataforma,  $46,8^\circ$  en total) y se iguala al máximo que podría proporcionar el servo (aproximadamente el doble del radio si no se consideran limitaciones, aunque en este caso se impone un 75%). Es necesario hacer notar que la carrera útil varía con las dimensiones de la pieza.

Existen dos formas rápidas de obtener este valor y planteadas en este proyecto, y las dos necesitan varios ensayos:

Una de ellas es utilizar el centro natural del espacio de trabajo y calcular el máximo valor del ángulo que permite hasta igualar ángulos mediante la utilización de los modelos matemáticos de la plataforma descritos en los apartados anteriores (3.2.2) y los análisis del volumen del espacio de trabajo (3.6.1). Si se opta por este último, se puede seleccionar también el peor caso posible y mediante iteraciones de análisis y modificaciones de longitud del antebrazo acercarse a la longitud óptima.

Otra forma de ajustar es mediante modificaciones de la longitud del brazo en el mismo entorno de diseño CAD. Con ayuda de los análisis de la plataforma se puede seleccionar el *Home Position* y el peor caso límite de amplitud de giro, y ajustar la longitud del brazo hasta puntos cercanos al óptimo.

Nótese que estos los métodos de resolución de la longitud óptima no son exactos, pero tampoco se pretende pues ambos métodos son iterativos. Basta con acercar la solución a la óptima para considerar el diseño como bueno. En el caso de la plataforma que se desarrolla en este proyecto, unas dimensiones de 40mm son aceptables.

En caso de necesitar buscar un ajuste muy fino de este parámetro, se debe tener en cuenta las dimensiones totales de la pieza y utilizar el primer método presentado con tantas iteraciones como se necesitasen para conseguir el ajuste deseado, e incluso aumentar la altura de la base.

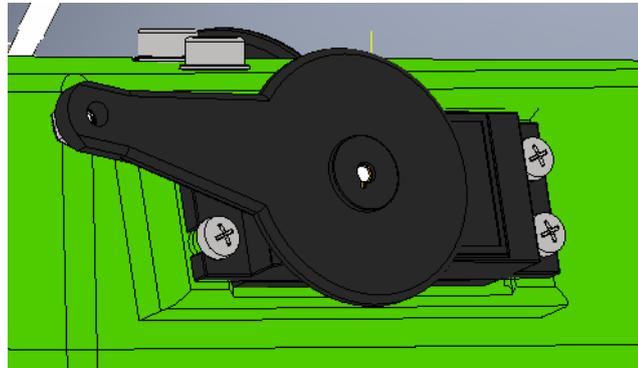


Figura 3-30 Detalle del brazo del servo

### 3.3.2.2.6 Orificios de la plataforma

La plataforma cuenta además con una serie de orificios pensados para cableado. En la parte superior de la base existe un orificio de gran tamaño por el que pueden atravesar los cables a la placa electrónica. Inicialmente estaba pensado para la conectar un posible giróscopo a la placa Arduino, pero se puede utilizar para acceder a la placa en cualquier momento.

Dos orificios cuadrados se encuentran entre la ubicación de dos servos. Estos dos orificios cuentan con las dimensiones apropiadas para permitir la entrada de los conectores a la placa arduino, un conector USB estándar tipo B macho y otro de alimentación Jack macho de 5.5mm DC.

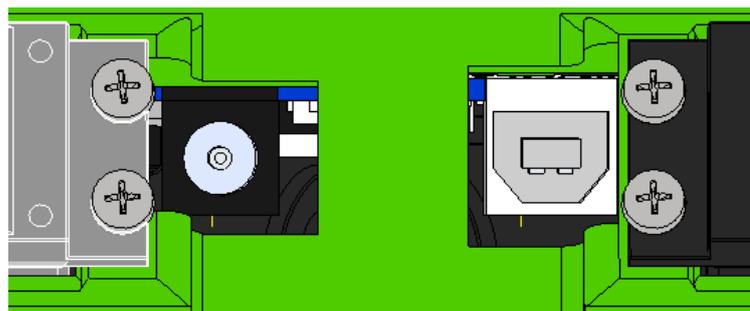


Figura 3-31 Orificios para las conexiones

### 3.3.2.2.7 Tornillería

Los anclajes de las piezas de la plataformas se ha procurado hacerlas mediante tornillos por dos motivos: su facilidad de ser montados y desmontados, y por su resistencia en lugares críticos. Por ejemplo, la utilización de tornillos en las rótulas y en el anclaje de los servos.

Desglose de tornillería en Anexo III: Planos.

### 3.3.2.2.8 Alimentación eléctrica

Una limitación de la placa Arduino UNO es su limitación para proveer de potencia los 6 servos. Sus pines solo permiten una intensidad máxima mantenida de 50 mA, muy lejos de la potencia requerida para controlar los 6 servos necesarios.

La alimentación de los servos se realiza directamente de la fuente de alimentación DC que alimenta la placa, de esta forma, se evita sobrecargar la controladora y posibles averías y mal funcionamiento. Por otro lado, el Arduino UNO comparte la masa (GND), lo que simplifica el cableado a los servos.

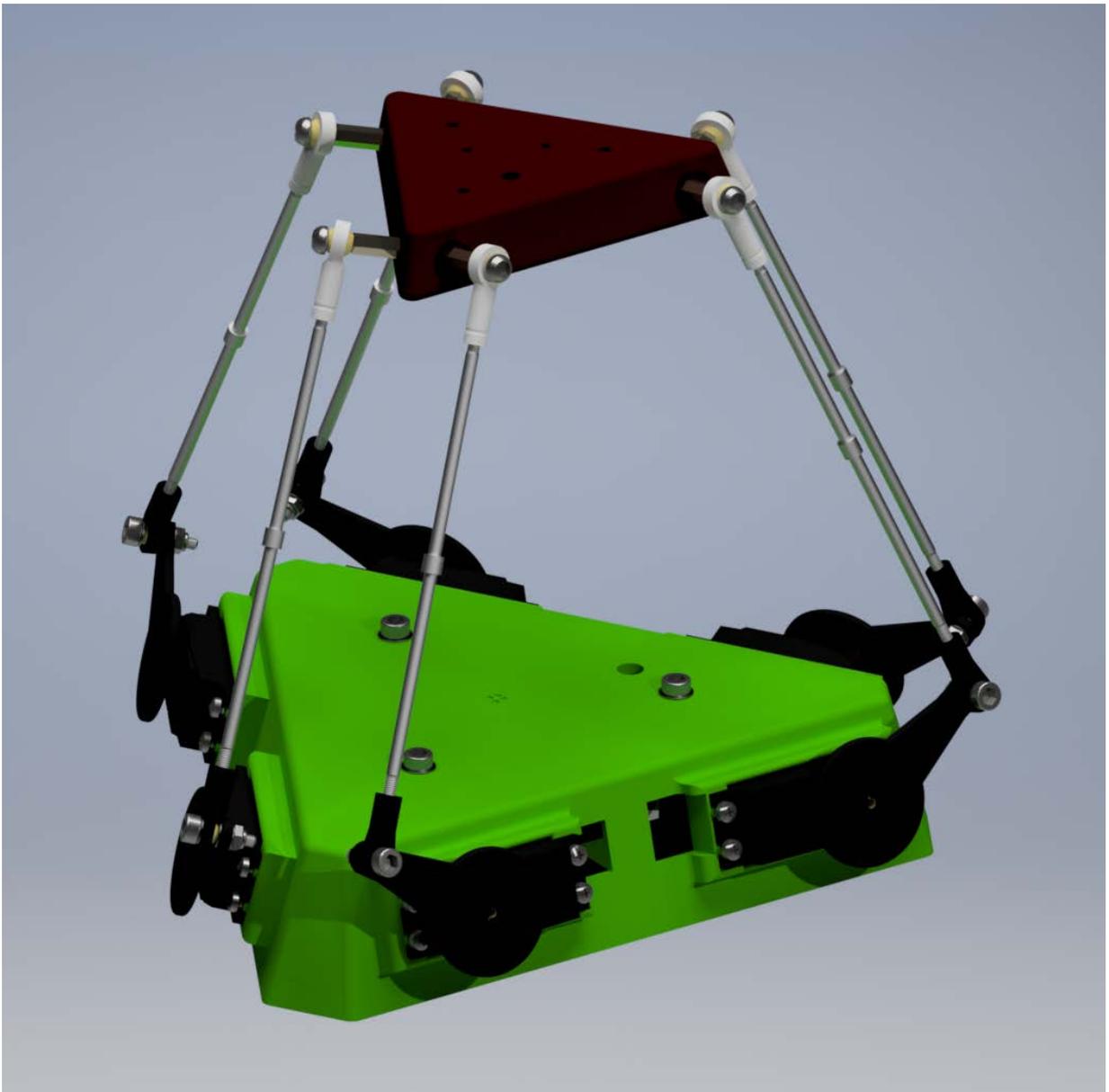
### 3.3.2.3 Resultado final

La forma del diseño pretende conseguir cierta exactitud en la fabricación final del robot, necesaria para obtener buenas prestaciones de exactitud y fiabilidad.

Ha tomado referencias de proyectos anteriores, aprendiendo de errores e imitando puntos fuertes. Igualmente ha introducido innovaciones frente a proyectos similares, que aseguran un mejor comportamiento de la estructura.

En todo momento se ha tenido el objetivo de intentar suplir mediante diseño futuras correcciones y ajustes mediante software, que aunque serán necesarios, facilitan futuros cálculos y soluciones (Anexo III: Planos).

Una vista general del proyecto se puede ver en la siguiente imagen:



**Figura 3-32 Imagen renderizada de la Plataforma Stewart**

### 3.4 Diseño del Software

La plataforma Stewart que aquí se presenta se controla principalmente desde un computador externo. El problema de posicionamiento de los efectores se realiza en un ordenador que envía las soluciones a la placa controladora. En primera instancia, la placa Arduino UNO actúa solo como controlador o *Driver* de los servomotores, teniendo la posibilidad de convertirse en hardware de enlace de futuros sensores.

En los siguientes apartados se plantea el software programado en cada dispositivo y su modo de funcionamiento.

#### 3.4.1 Programa esclavo en Arduino UNO

El código que utiliza la placa controladora tiene un simple objetivo: recibir información por el puerto serial (USB) y transformarla en pulsos de control de los servos. Dependiendo de la posición de cada servo se consigue actuar sobre la posición y orientación del efector.

Los servos se controlan mediante el envío de pulsos de una determinada duración. Según el ancho del pulso, se consigue modificar la posición del actuador. En la se muestra un ejemplo de un pulso PWM<sup>7</sup> que ordena al servo ubicarse en su posición central.

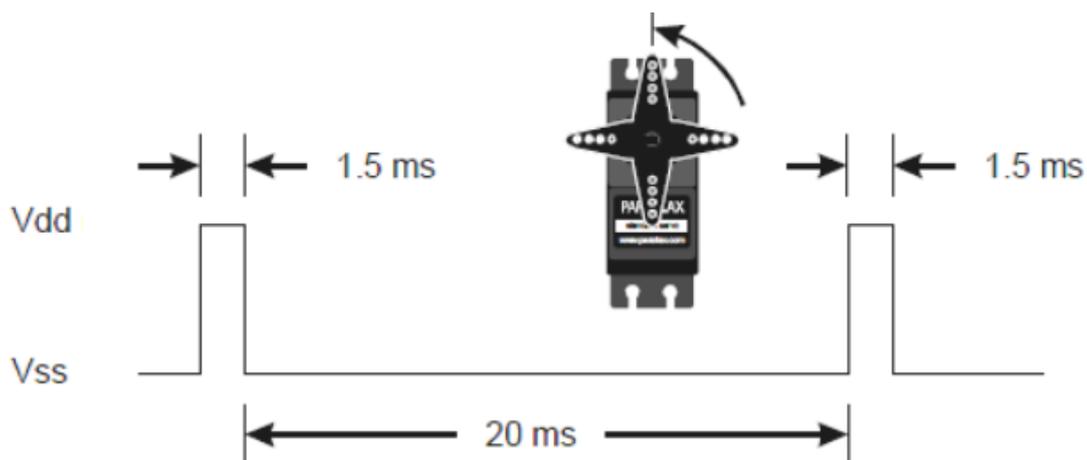


Figura 3-33 Control de servomotor mediante ancho de pulsos

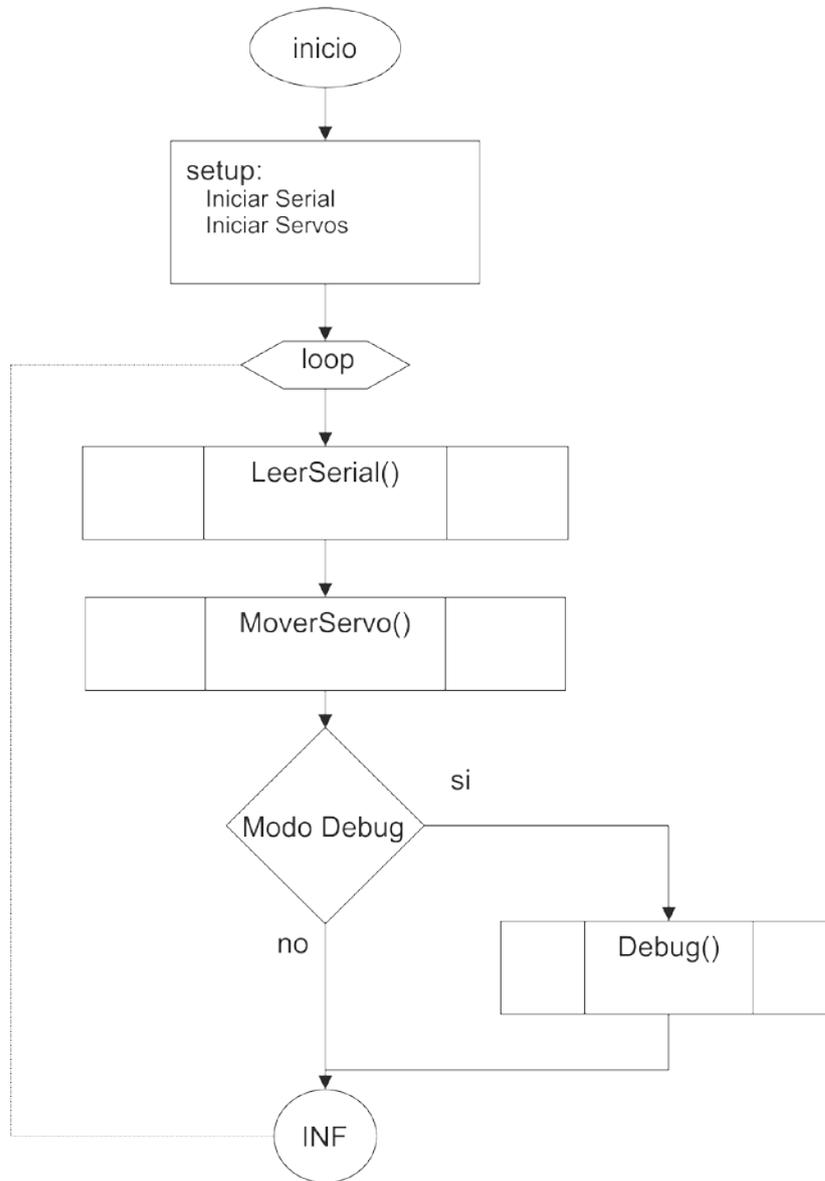
Este proceso es transparente para el programa desarrollado en Arduino UNO, que mediante librerías predefinidas permite controlar servos sin entrar en profundidad.

En resumen, el código en utilizado en Arduino se encarga de leer una cadena de caracteres o *String* enviados por el puerto serial con la apertura que debe dar a cada servo, reconocer en esta cadena la información que se ha enviado, y mandar a cada servomotor el correspondiente pulso.

El código está pensado para admitir mejoras en el futuro. En esta línea, en lugar de programar códigos rígidos y rápidos, se opta por códigos que permiten la transmisión de cadenas flexibles que admiten el envío de los valores de los ángulos y de solicitudes al hardware.

<sup>7</sup> PWM: Modulación por ancho de pulso

El funcionamiento del código programa es simple. Primero ejecuta un *setup* donde inicia las variables, la conexión *Serial* y los servomotores. Después ejecuta un bucle indefinido donde lee la información recibida del ordenador y almacena la información recibida, mueve los servos a la posición que tiene almacenada y si está activo, ejecuta el modo *debug* con objeto de comprobar el correcto funcionamiento del sistema. El funcionamiento general se define en la Figura 3-33.



**Figura 3-34 Diagrama del código Arduino General**

La función *MoverServo()* son solo 6 funciones definidas en la biblioteca *Servo* cargada en el programa que envía el pulso correspondiente por cada salida.

La función *Debug()* devuelve por el puerto *Serial* el *String* recibido. Se puede activar o desactivar mandando por serial la orden *\$DI* o *\$DO* respectivamente.

La función *LeerSerial()* es la más compleja del programa, pues se encarga de leer el código recibido, discriminar que es cada información y actuar en consecuencia. Su funcionamiento queda explicado en la Figura 3-34.

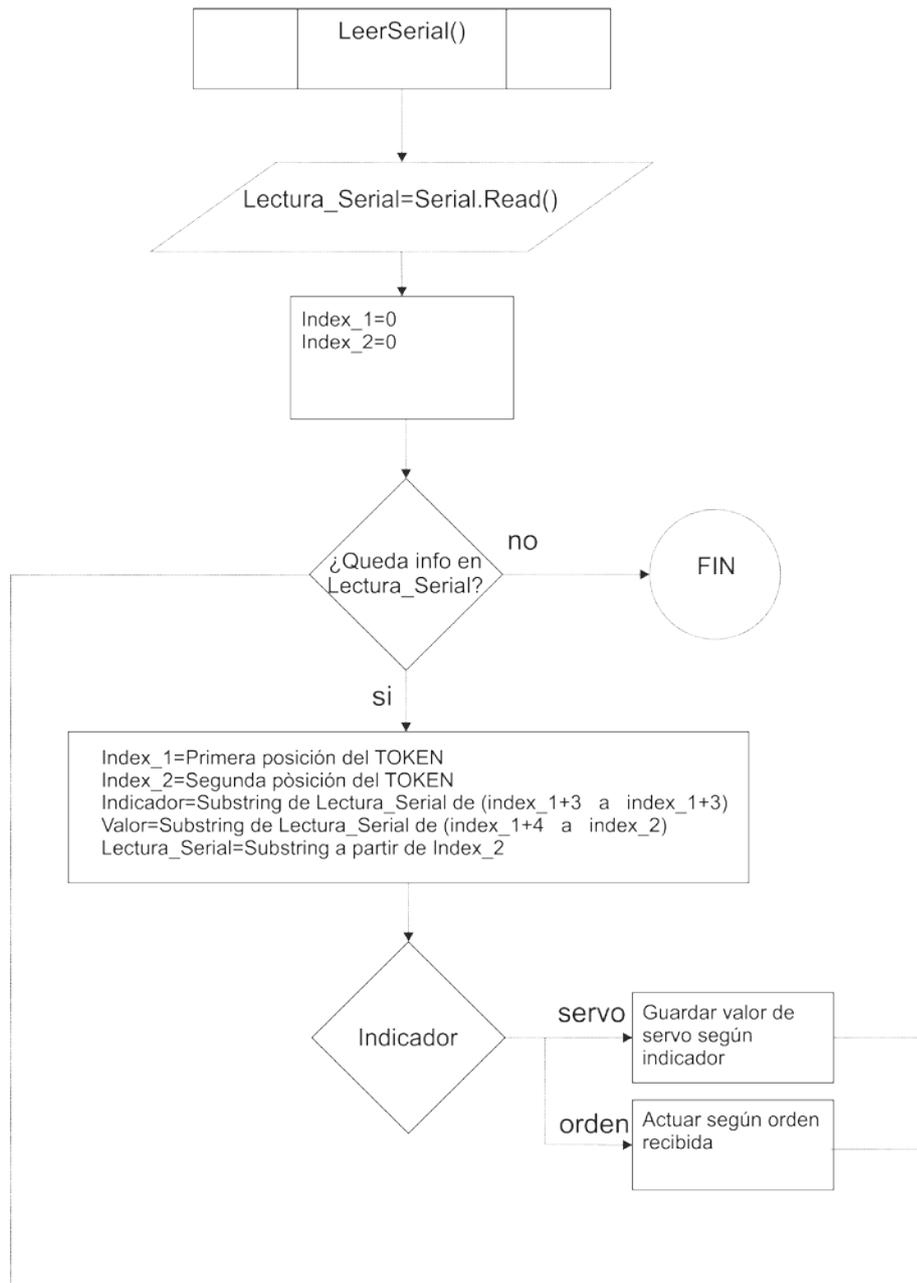


Figura 3-35 Diagrama de Flujo Función LeerSerial()

Como se comentó al principio del apartado, se intenta buscar siempre un diseño que permita la continuidad y el desarrollo; esta función admite de nuevas funciones sin variar su estructura. Configurando nuevos códigos y órdenes se puede interactuar con la plataforma, utilizando un código muy flexible de comunicación, y que ha demostrado su eficacia.

### 3.4.1.1 Código

Por su extensión, el código completo queda anexo en: Anexo II: Código Arduino.

### 3.4.2 Programa maestro en MATLAB

El Software de control de la plataforma Stewart está íntegramente desarrollado en el lenguaje de programación MATLAB. Este lenguaje de alto nivel tiene varias ventajas y opciones que han decantado la elección por él: programación rápida y sencilla de las soluciones a la cinemática inversa, comunicación bidireccional por puertos al ordenador, capacidad de generar ejecutables independientes y facilidad para la creación de GUI<sup>8</sup>s.

El programa maestro integra las soluciones del modelo matemático y las sentencias de comunicación con el Arduino UNO. Permite además una serie de operaciones simples. Todo ello está programado con posibilidad de seguir creciendo en futuras líneas de investigación.

Todo programa se divide en *Script* y *funciones*, archivos típicos de este lenguaje, que sirve para ordenar y poder mejorar por separado las distintas partes del programa.

#### 3.4.2.1 Funcionamiento

La estructura del programa principal STEWART es sencilla: ejecuta primero la carga de constantes e inicia variables, para luego ejecutar un bucle indefinido. Muy parecido al software implementado en Arduino (Figura 3-44).

En el *setup* se cargan las constantes que va a utilizar el sistema. Por comodidad se encuentran guardadas en el archivo *setting.m*, con estructura de archivo de texto pero que puede ser ejecutado directamente en MATLAB. Se encuentra aquí información referente a las dimensiones del diseño y los valores por defecto del programa.

Se inician también las variables a utilizar, así como la apertura del puerto de comunicaciones con Arduino.

El bucle repetido se encuentra controlado por la variable *Programa\_activo*. Para terminar la ejecución solo hay que cambiar este valor por uno negativo.

Dentro del bucle, el primer paso es obtener la matriz de posición y orientación del efector. Este punto es el más importante del programa. Llamando a un determinado *Script* o función que devuelva una determinada matriz con los 6 grados de libertad de la plataforma se controla la plataforma. Para crear diferentes modos de control, solo hace falta programar un código y llamarlo para ejecución.

Una vez obtenida la matriz, el siguiente paso es calcular la posición de los servos. Para ello se ejecuta la función *Soluciones()*, cuyo argumento es la propia matriz de posiciones y orientación. A su vez, esta función devuelve una matriz con las 2 posiciones posibles de los 6 servos, y un segundo valor con la comprobación que confirma la solución o la niega.

Este código está basado en el modelo matemático obtenido al principio del proyecto, siendo prácticamente el mismo, solo con matices para el programa.

Para seleccionar entre enviar los paquetes cada cierto tiempo o con cada cambio posición/movimiento, se inserta un nuevo bucle que actúa como cronometro y regula las ordenes de envío. Aparte de evitar la saturación de la placa Arduino, pretende ser utilizado para regular el envío de datos en recreaciones de mediciones almacenadas en ficheros.

Finalmente, si esta activada la función de envío, se manda el paquete con las ordenes apropiadas mediante el protocolo determinado al Arduino (3.4.3).

---

<sup>8</sup> GUI: Graphic User Interface: Interfaz gráfica de usuario

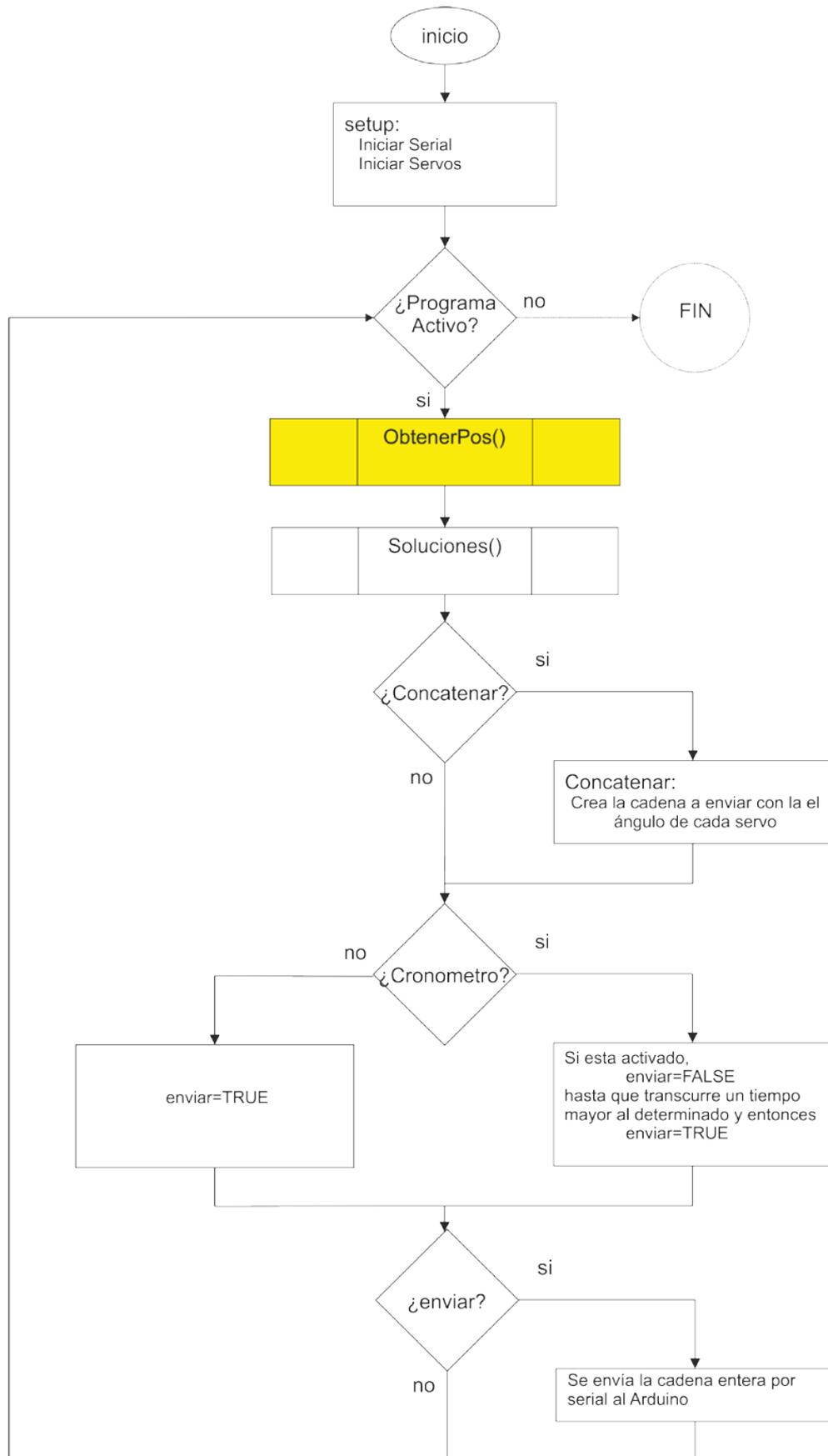


Figura 3-36 Diagrama de funcionamiento general del programa Maestro de MATLAB

### 3.4.2.2 Código del programa

Por su extensión, el código completo queda anexado en: Anexo I: Código Maestro MATLAB

### 3.4.3 Protocolo de comunicación

La comunicación entre ordenador y robot se realiza por puerto serial, predefinido por el puerto COM8. Permite la comunicación bidireccional y su tasa de transferencia máxima es mucho mayor que la que utiliza el proyecto, que se limita a la máxima que permite Arduino. Las largas cadenas de información que se envía MATLAB obligan a exprimir la tasa de transferencia a 115200 baudios para conseguir un refresco de los servos de mayor de 10 veces por segundo. La conexión se realiza mediante USB.

Los paquetes de información que recibe la placa Arduino se han diseñado para que sean flexibles y permitan un desarrollo en el futuro. La estructura es la siguiente:

\$	INDICADOR	CARGA ÚTIL
----	-----------	------------

Utilizándose el símbolo \$ como separador entre las cadenas de información. El indicador es un código de 2 caracteres que refleja la identidad de la información. La carga útil es la información que acompaña al indicador.

Cuando se envía el ángulo de un servo, el indicador se codifica con una “S” seguido del número del servo, y la carga útil se codifica mediante “:” seguidos del valor ángulo del servo multiplicado por 10, tomado desde la posición más baja del servo y en sentido de las agujas del reloj.

\$	S_	: _ _ _
----	----	---------

Por ejemplo, si se quiere ordenar al servo número 4 que tome la posición mirando al oeste, se enviaría:

\$\$S4:900

La función *debug()* se puede activar (D1, para desactivar: D0) por medio del serial, enviado solo el indicador, puesto que no necesita carga útil. El código a enviar sería:

\$D1

Se puede concatenar una serie de órdenes, de hecho, es lo que hace el programa MATLAB, enviando cadenas de este tipo:

\$\$S1:3400\$\$S2:100\$\$S3:0001\$\$S4:680\$\$S5:2500\$\$S6:3599\$\$D0

### 3.5 Fabricación y montaje

La fabricación es el proceso por el cual la idea se torna realidad en forma de prototipo. La fabricación de este proyecto es sencilla, sin embargo utiliza tecnologías y técnicas nuevas en el prototipado rápido convencional.

Se puede dividir la fabricación en dos partes: Ensamblado y fabricación de piezas. Además se añade un tercer de calibración y un último apartado dedicado al presupuesto de los elementos utilizados.

#### 3.5.1 Fabricación: Impresión 3D

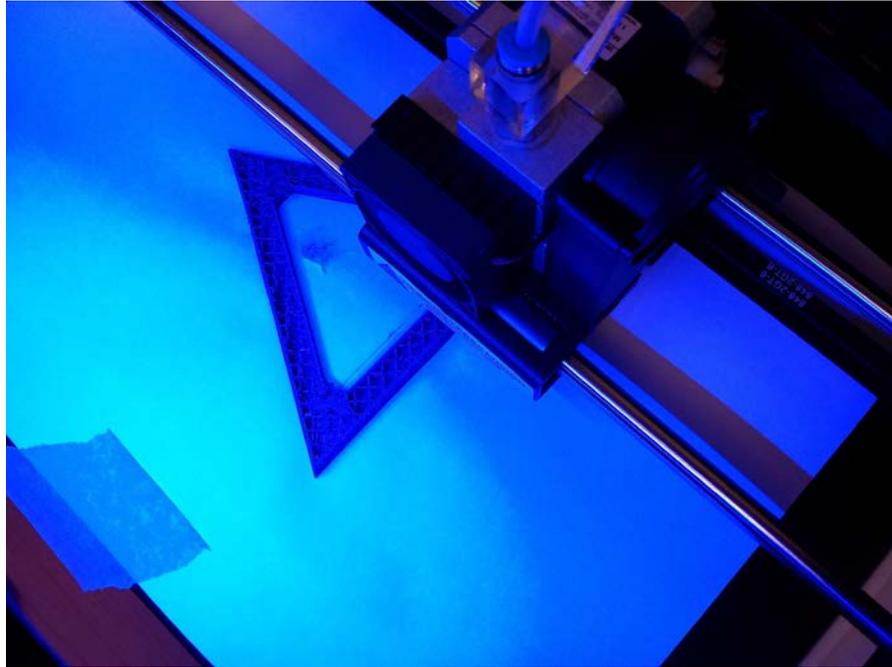
La fabricación de las piezas de plástico diseñadas, en concreto las dos piezas de la base, el efector y los brazos de los servos, se construyen mediante una impresora en 3D de la marca BQ. Como material de construcción utiliza un filamento de plástico PLA (véase el apartado 3.3.2.1.1).



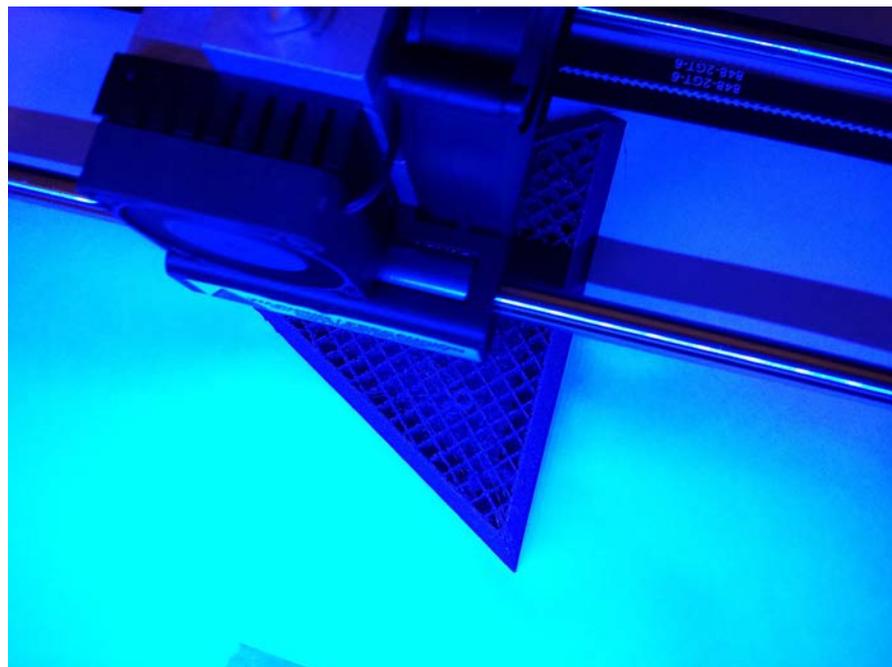
Figura 3-37 Impresora Witbox 3D

Un problema importante de este tipo de impresoras es su limitado espacio de trabajo, que se traduce en piezas de tamaño muy inferior al volumen total de la máquina. Algunas de las consecuencias se pueden observar en el apartado 3.3.2.2.1.

A la hora de imprimir estas piezas se puede configurar ciertos parámetros, como por ejemplo, la cantidad de aporte de material, así como la densidad de la pieza, reduciendo la cantidad de plástico PLA utilizado. En la Figura 3-37 y en la Figura 3-38 se puede observar la impresora 3D trabajando.



**Figura 3-38 Impresión del efector tras 40 min**



**Figura 3-39 Impresión del efector tras 2h 30 min**

La primera impresión del efector es la de una pieza sólida, muy superior a la necesaria para este prototipo. Sin embargo, las piezas que conforman la basada y los brazos de los servos son mucho más frágiles de lo estimado. Aun así se realizaran ensayos más adelante para comprobar su solidez.

Si bien algunas piezas obtenidas por impresión son lo suficientemente buenas para el soportar los esfuerzos requeridos, la definición y acabado no lo son tanto. Sin entrar en detalle de la rugosidad o exactitud de las superficies o en la definición, se puede asegurar que los ajustes no son tan precisos como deberían según las especificaciones de la impresora (precisión 0.1 mm).

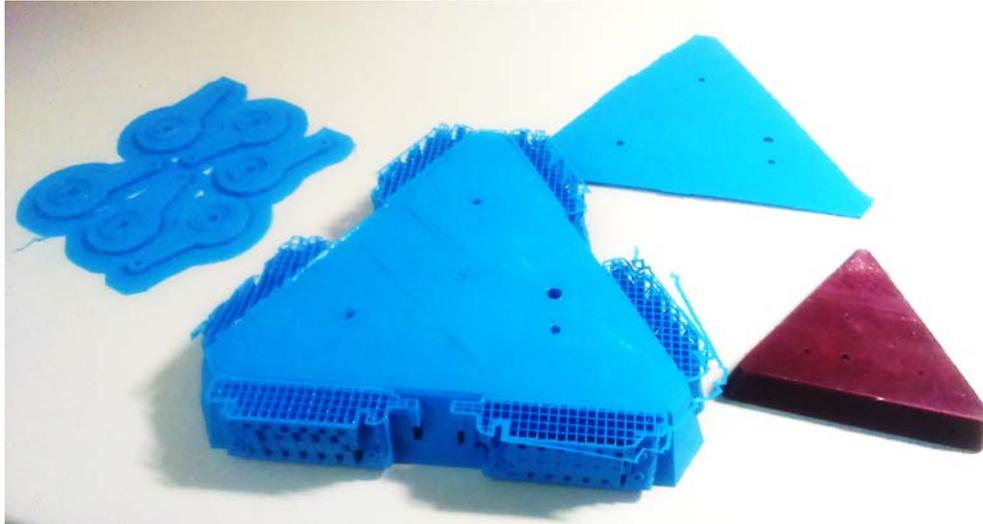


Figura 3-40 Piezas impresas

Es fácilmente entendible debido al grosor del hilo de PLA que indudablemente afecta al detalle de las superficies, y a la viscosidad del plástico fundido. Este problema no es tal si no importa forzar el apriete de las piezas o se utilizan tornillos de rosca chapa, como se ha propuesto en este proyecto.

### 3.5.2 Ensamblaje

El montaje final de la pieza se realiza con los elementos impresos y los elementos adquiridos. El montaje se realiza siguiendo el plano de explosionado del Anexo III: Planos.

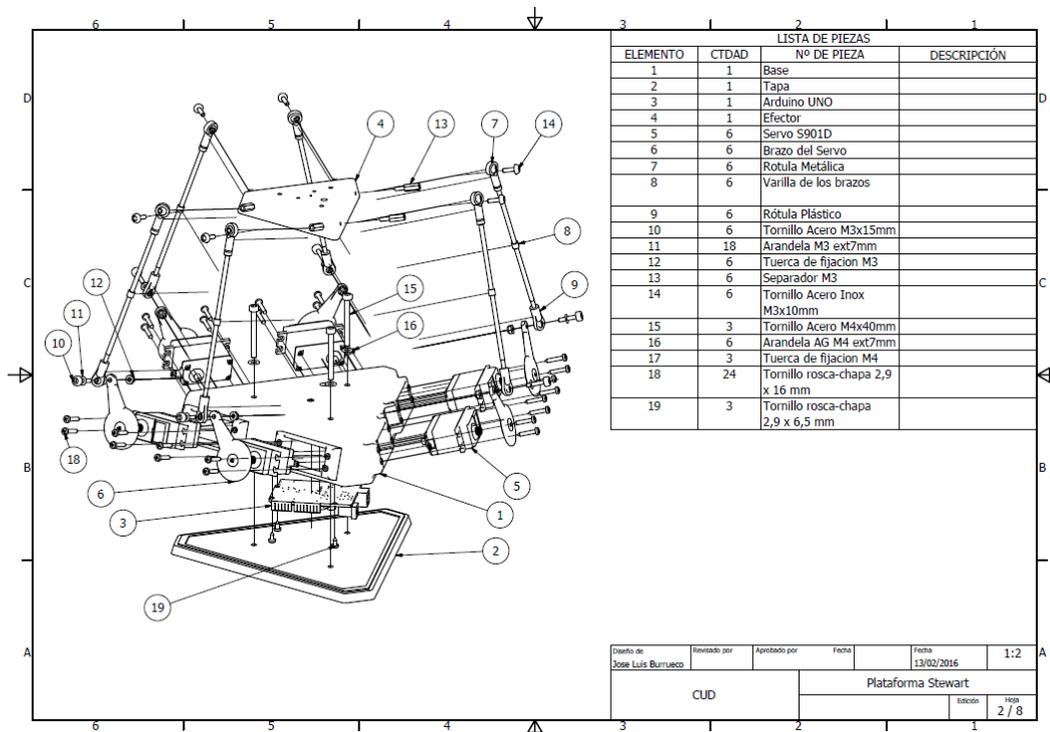
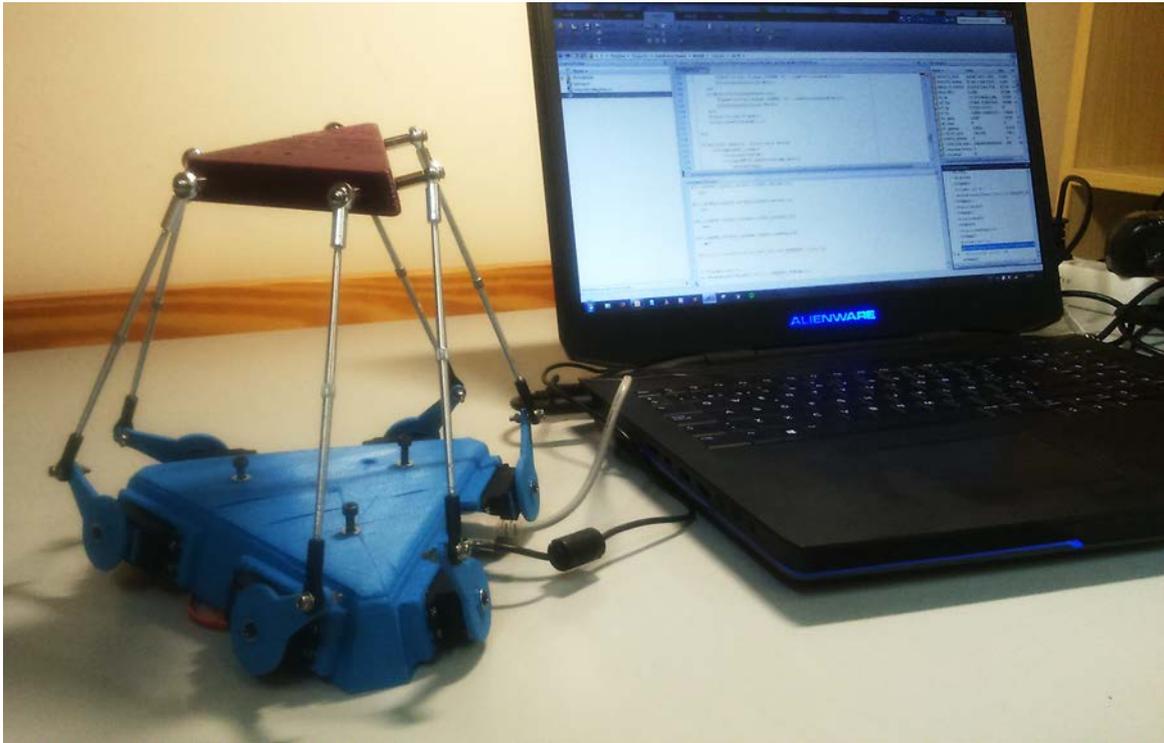


Figura 3-41 Ensamblaje (Anexo III: Planos)

El prototipo queda finalmente montado como se aprecia en la imagen siguiente:



**Figura 3-42** Plataforma Stewart ensamblada

### 3.5.3 Calibración

Un apartado sumamente importante en la fabricación del prototipo y de cualquier robot o máquina de precisión es su calibración. El ensamblado de las piezas y los elementos impresos pueden no tener las medidas descritas en el diseño, por lo que es importante realizar un ajuste de estas nuevas medidas.

Para corregir estos errores se actúa de dos formas: Ajustando las piezas a las medidas del diseño y utilizando los valores reales en el modelo teórico que nos devuelve la solución real.

En la puesta en marcha de este prototipo, el calibrado se ha llevado a cabo de la siguiente manera:

1. Ajuste al máximo posible de los valores teóricos a los reales mediante la corrección en el ensamblado.
2. Utilización de los valores reales medidos con precisión en el software, lo que conlleva la utilización un modelo más próximo al construido.
3. Calibración de los parámetros en el software por ensayo y error.

El tiempo invertido en esta parte del desarrollo es precisión que se obtiene en el prototipo.

### 3.5.4 Presupuesto

Un requerimiento esencial para este proyecto es el bajo costo que debía alcanzar. Por este motivo, se hace necesario presentar un presupuesto detallado del precio de los elementos utilizados y el valor total del prototipo.

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio
Arduino UNO	1x	24,5 €	<b>24,50</b>
Servos S901D	6x	9,09 €	<b>54,54</b>
Alimentador 6V	1x	13,25 €	<b>13,25</b>
Varilas metálicas	6x	0,54 €	<b>3,24</b>
Rótulas metálicas	6x	2,61 €	<b>15,66</b>
Rótulas de plástico	6x	1,57 €	<b>9,42</b>
Base	1x 0,073 Kg	16,99 €/Kg	<b>1,51</b>
Tapa	1x 0,082 Kg	16,99 €/Kg	<b>1,39</b>
Efactor	1x 0,089 Kg	16,99 €/kg	<b>1,51</b>
Brazo del servo	6x 0,001 Kg	16,99 €	<b>0,10</b>
Separador roscado 10mm M3 x M3	6x	0,26 €	<b>1,53</b>
Tornillo Allen M3 x 8mm	6x	0,18 €	<b>1,09</b>
Tornillo Allen M3 x 15 mm	6x	0,11 €	<b>0,65</b>
Tornillo Allen M4 x 40 mm	3x	0,23 €	<b>0,70</b>
Tornillo rosca-chapa 2,9 x 6,5 mm	4x	0,03 €	<b>0,11</b>
Tornillo rosca-chapa 2,9 x 16 mm	24x	0,05 €	<b>1,16</b>
Arandela plana M3 x 0,5 mm	24x	0,01 €	<b>0,15</b>
Arandela plana M4 x 0,8 mm	6x	0,01 €	<b>0,07</b>
Tuerca hexagonal 7mm M4	3x	0,08 €	<b>0,23</b>
Tuerca de bloqueo M3	6x	0,04 €	<b>0,24</b>
<b>TOTAL:</b>			<b>131,07 €</b>

Tabla 3-4 Presupuesto

### 3.6 Análisis de la plataforma

El análisis de las características de la plataforma es crítico para conseguir el diseño óptimo de la plataforma. En este apartado se lleva a cabo una serie de simulaciones realizados en MathWorks MATLAB 2013a y en Autodesk Inventor 2016 para conseguir los parámetros teóricos que configuran la plataforma, así como las especificaciones (también teóricas) del robot paralelo.

#### 3.6.1 Obtención de las posiciones límites de trabajo

La obtención del espacio de trabajo es de vital importancia en este proyecto. Además de calcular un límite práctico de la propia plataforma Stewart, su obtención permite calcular el centro natural del área de trabajo, también denominada *Home Position*. Este punto representa la ubicación natural del efector, y sobre él se realizan cálculos de diseño (3.3.2.2.4) y optimización. Además, este punto es usado como punto de referencia para la introducción de las posiciones del robot.

Antes de empezar, es necesario tomar las medidas de ángulos y distancias y adaptar el modelo (Figura 3-35). Esta información se almacena (función *Setting()*) para su posterior uso en MATLAB, imprescindible para el correcto cálculo del espacio de trabajo (Anexo I: Código Maestro MATLAB).

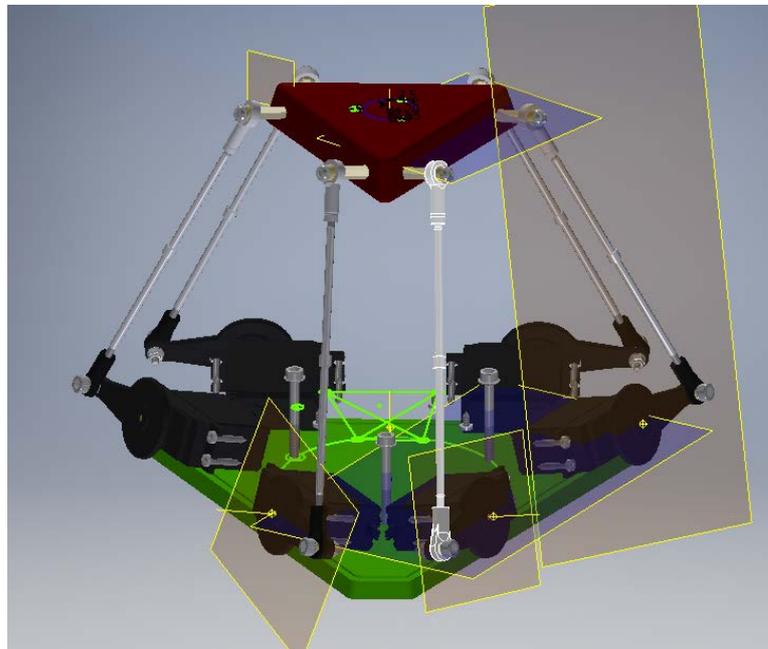
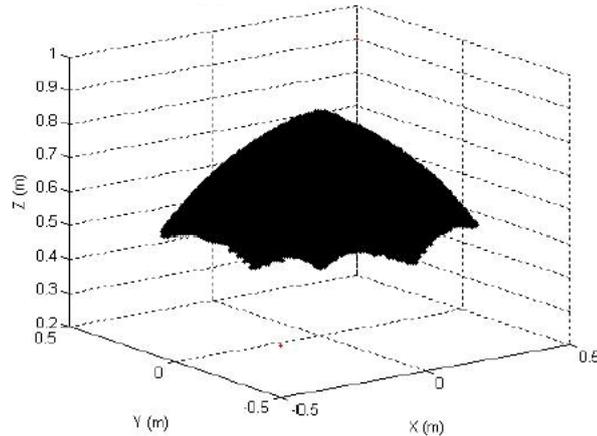


Figura 3-43 Recopilación de medidas utilizando intersecciones de planos

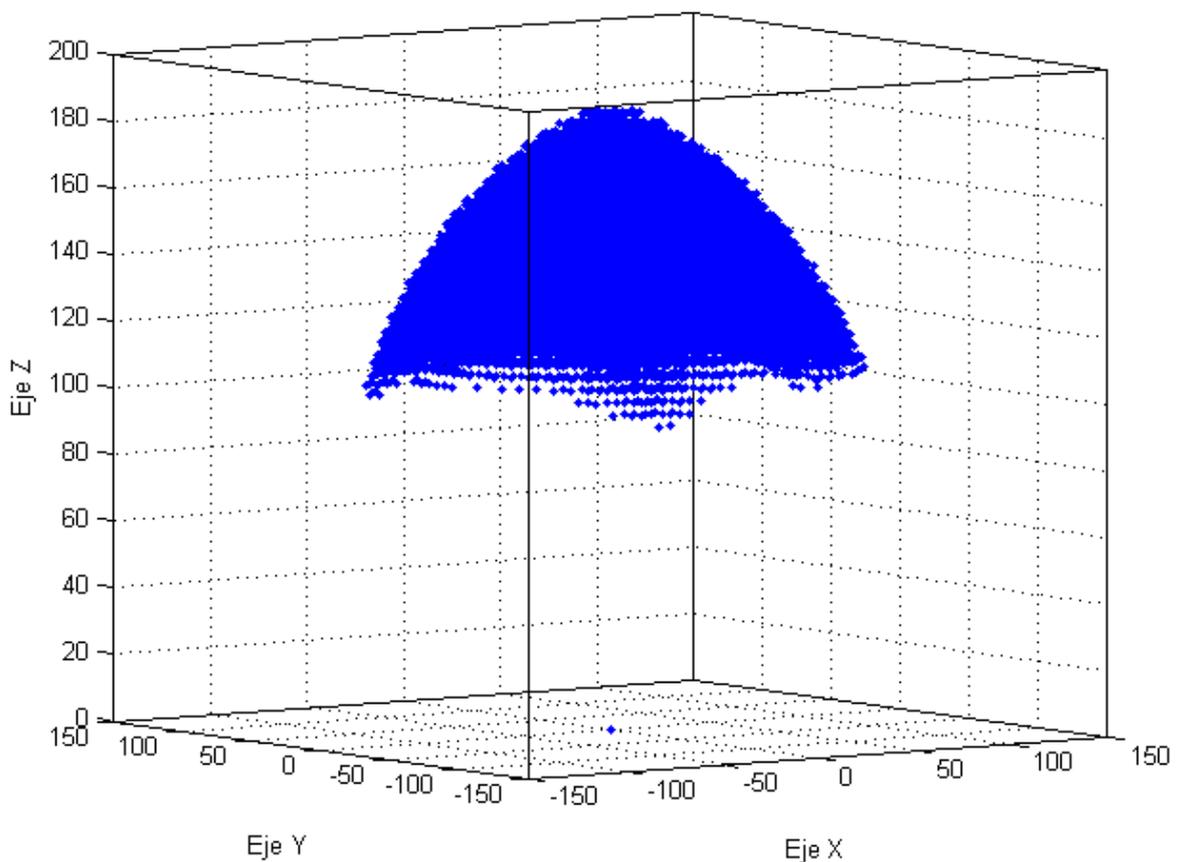
La obtención de las posiciones posibles se realiza mediante una simulación donde se calculan las soluciones para un volumen prismático determinado. Si la solución es posible, se almacena esta posición dentro del espacio de trabajo. La discriminación de las soluciones posibles se realiza mediante el cálculo de las soluciones y una comprobación de distancias por un método alternativo, (programado en la función *Soluciones()*).

El espacio de trabajo que debe salir debe ser simétrico y en forma de paraguas (Figura 3-37).



**Figura 3-44** Área de trabajo (Fuente: [19])

Realizando una simulación, con valores neutros en los giros ( $\text{pitch}=0$ ,  $\text{yaw}=0$ ,  $\text{roll}=0$ ) y el centro de la base como punto de referencia, se obtiene el espacio de trabajo de esta plataforma:



**Figura 3-45** Espacio de trabajo la plataforma

Se puede observar una similitud entre el espacio obtenido y el obtenido por otros trabajos [19].

Las posiciones alcanzables varían según los parámetros de posición y orientación, es decir, con los 6 grados de libertad. La imposibilidad de representar toda la casuística obliga a describir solo los puntos más significativos, aunque no debería de ser ningún problema para comprender el funcionamiento de la plataforma por completo.

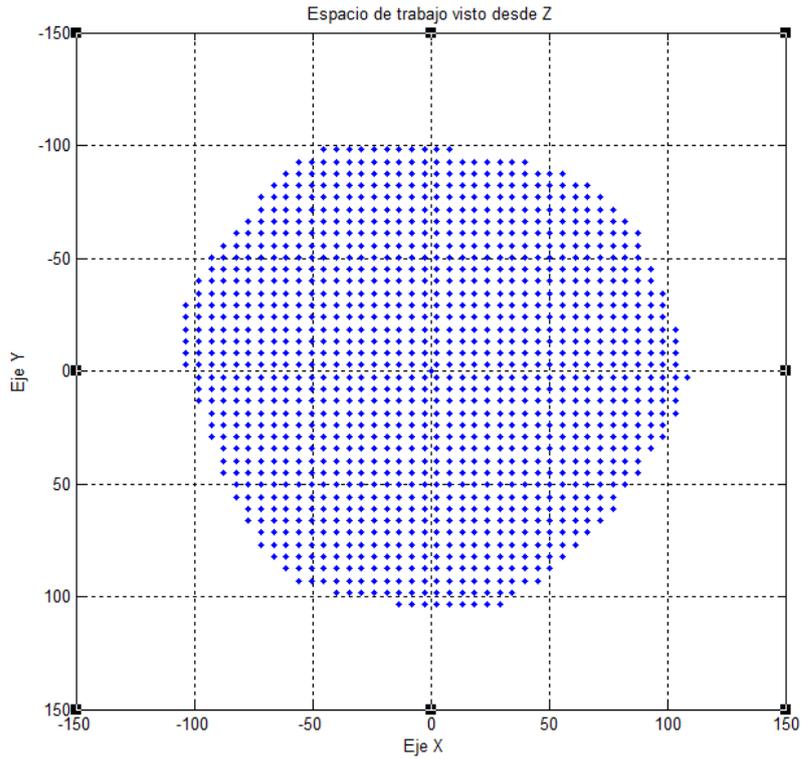


Figura 3-46 Espacio de trabajo: Vista X

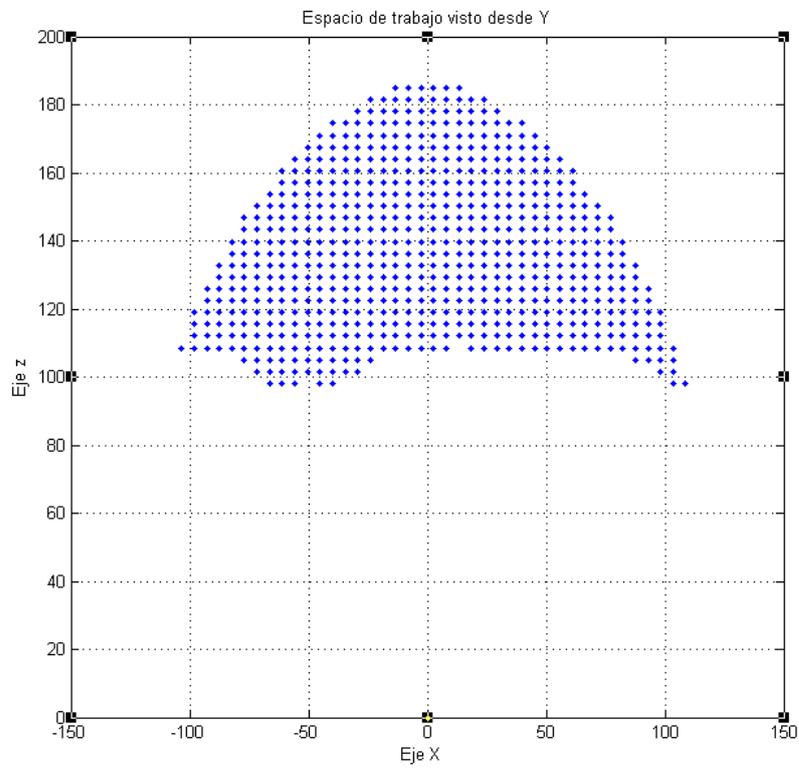


Figura 3-47 Espacio de trabajo: Vista Y

El cálculo de la *Home Position* o centro natural se puede calcular de distintas maneras. Este proyecto lo soluciona calculado el centro de masas del espacio de trabajo. El resultado arrojado es de 136,32 mm sobre la base.

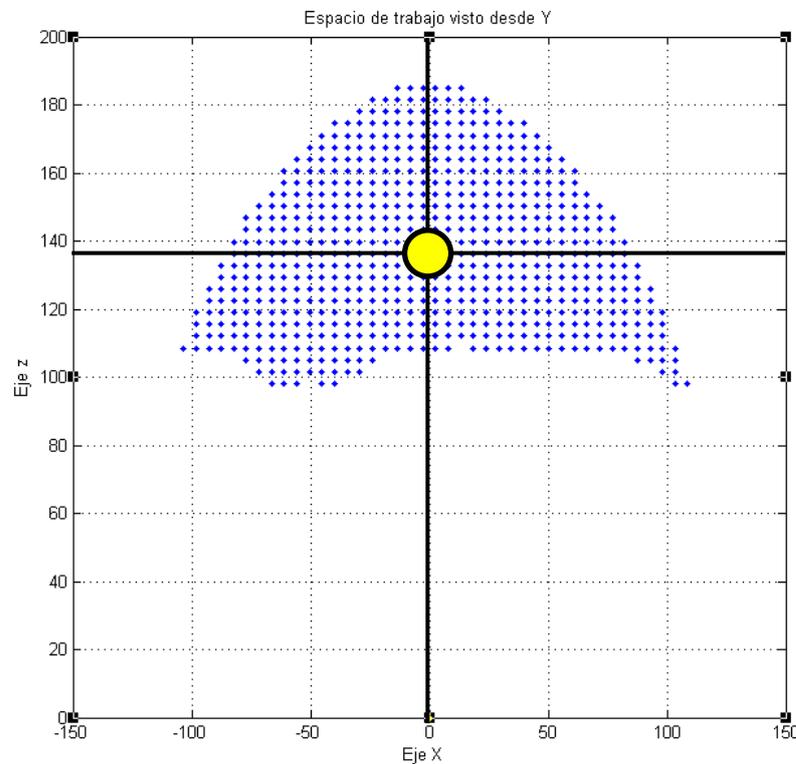


Figura 3-48 Home Position

Para facilitar la ubicación del efector, se tomara este punto como el nuevo punto de referencia, quedando el centro de la base con una nueva posición (0, 0, -Home Position).

### 3.6.2 Obtención de la velocidades/aceleraciones máximas

Al no disponer de la cinemática directa, el método utilizado para obtener las velocidades máximas y las aceleraciones consiste en realizar el cálculo de las posibles posiciones del efector y calcular el giro necesario de los servos para llegar de un lugar a otro próximo a él. Conociendo la distancia entre los puntos y la velocidad de rotación de los servos se puede calcular la velocidad y la aceleración.

Este método no es exacto, pero es eficaz. Al igual que las simulaciones en mecánica que necesitan de mallados, mientras más pequeña es la distancia entre puntos, más exacto es el resultado que se obtiene.

La obtención de la velocidad es un método simple:

$$d = d_0 + v \cdot t + \frac{1}{2}at^2 \quad (3-31)$$

$$t = \frac{\theta}{\omega} \quad (3-32)$$

Siendo  $d$  la distancia desplazada,  $\theta$  el ángulo del servo y  $\omega$  la velocidad de giro del servo. Si obviamos para cada término la aceleración o la velocidad inicial, con las dos ecuaciones ((3-31) y (3-32)) tenemos:

$$v = \frac{d \cdot \omega}{\theta} \tag{3-33}$$

$$a = \frac{2 \cdot d \cdot \omega^2}{\theta^2} \tag{3-34}$$

Con estos dos términos podemos tener una primera aproximación a las velocidades y aceleraciones que se pueden alcanzar.

Las simulaciones se configuran de la siguiente manera:

- Entre los 6 diferentes recorridos de los servos para alcanzar a otra solución, se escoge siempre el mayor.
- De entre todos los recorridos posibles, se escoge el mayor y el menor de ellos.
- El valor a utilizar es la media aritmética de ambos.

Hay que tener presente que las simulaciones son nodales, esto es, la velocidad máxima o aceleración alcanzada entre los puntos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones:

<b>Simulación</b>	
<b>Velocidad del servo</b>	0,15 seg/60 grados
<b>Velocidad lineal máxima</b>	1,017 m/s
<b>Velocidad lineal mínima</b>	0,011 m/s
<b>Velocidad lineal media</b>	0,5402 m/s
<b>Aceleración lineal máxima</b>	24,11 m/s <sup>2</sup>
<b>Aceleración lineal mínima</b>	0,012 m/s <sup>2</sup>
<b>Aceleración lineal media</b>	5,023 m/s <sup>2</sup>

**Tabla 3-5 Simulación cinemática**

Hay que tener presentes que estos resultados varían muchísimo de un lugar a otro y no son datos suficientes para describir la plataforma. Aunque si es cierto que si se pueden alcanzar ciertos valores en un momento determinado y la velocidad media es un valor aproximado al real.

### 3.6.3 Cálculo de la carga máxima

Para el cálculo del empuje máximo se realizará una simulación de cada punto del espacio de trabajo y se calculará el sumatorio de fuerzas producido por los servos. El resultado de la simulación desvelará la carga mínima, máxima y media que puede levantar.

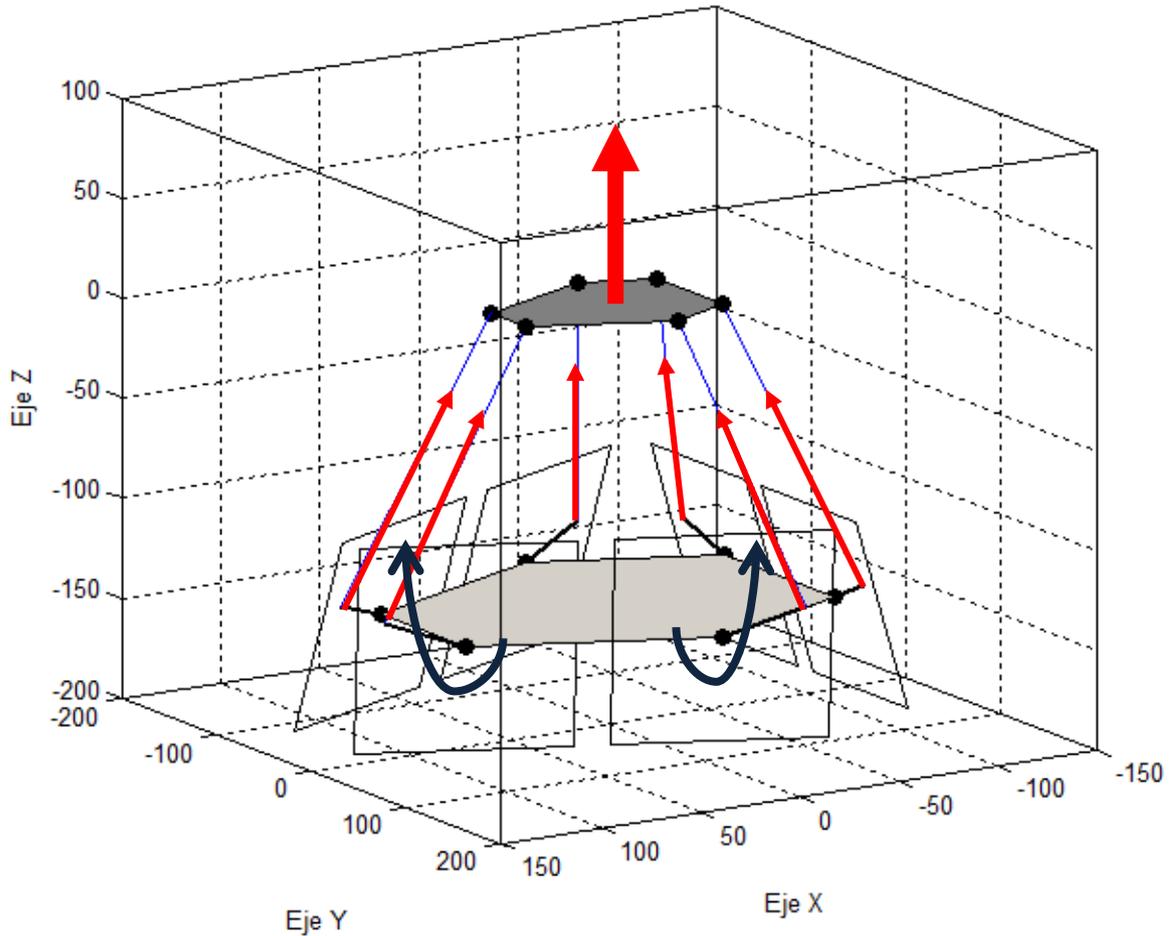


Figura 3-49 Esquema del estudio

El empuje en el eje Z del efector se calcula como el sumatorio de fuerzas ejercidas por los brazos de cada servomotor:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_i \quad (3-35)$$

$$F_{zi} = \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{u}_z \quad (3-36)$$

Siendo  $\mathbf{r}$  la longitud del servo y  $\mathbf{M}$  el torque, la fuerza resultante es el sumatorio de todos los servos:

$$\mathbf{F}_{Tz} = \sum_i F_{zi} \quad (3-37)$$

El resultado de la simulación realizada:

Simulación de cargas de trabajo	
Cantidad de simulaciones	35013
Fuerza mínima	2.66 Kg
Fuerza máxima	18.70 Kg
Fuerza media	14.78 Kg
Fuerza máxima soportada en el 95% de los casos	8.8 Kg
Fuerza máxima soportada en el 90% de los casos	11.8 Kg
Fuerza máxima soportada en el 10% de los casos	17.9 Kg
Fuerza en la Home Position	18.67 Kg
<b>Carga Nominal 95%</b>	<b>8.8 kg</b>

Tabla 3-6 Simulación de cargas

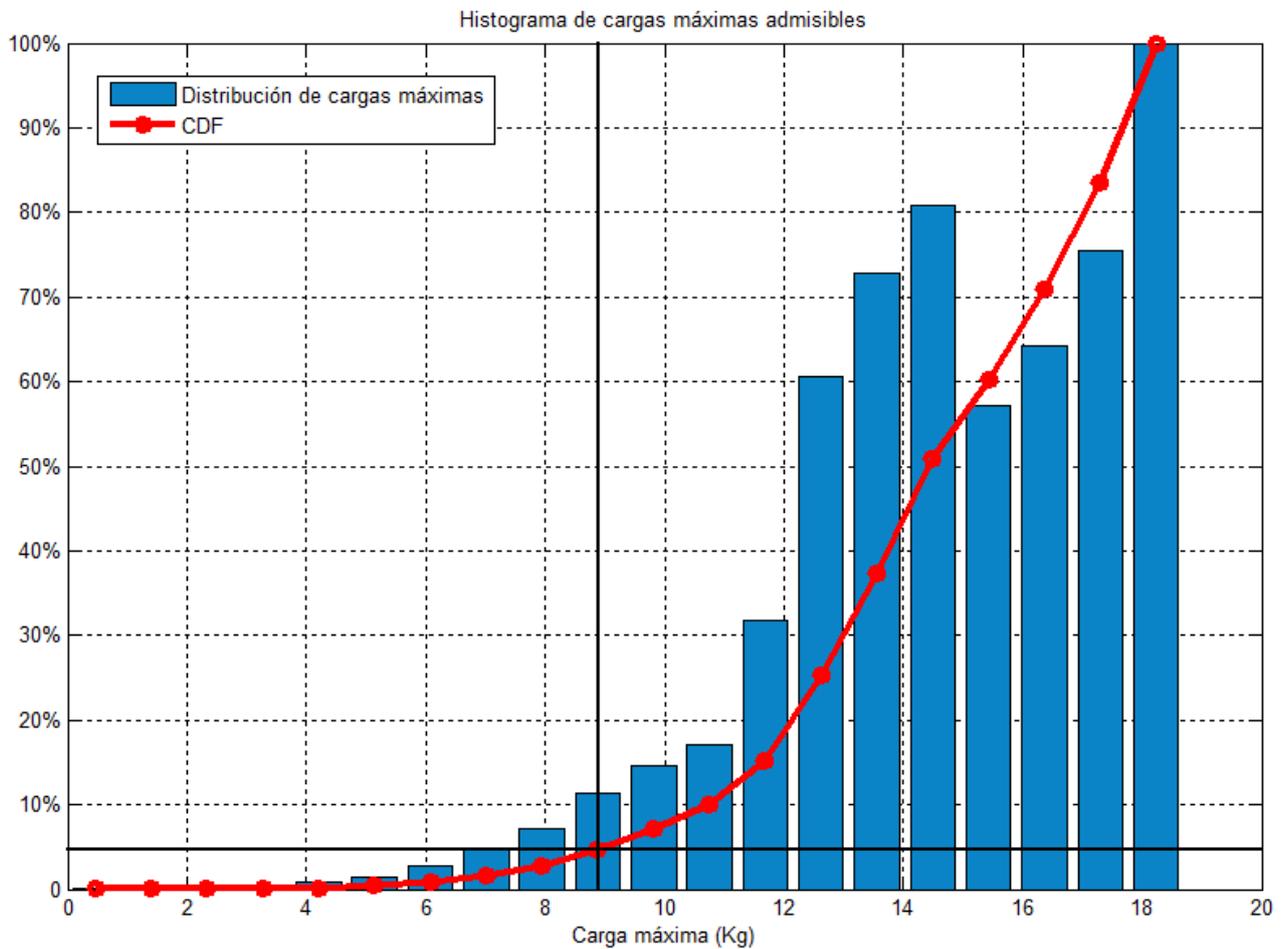


Figura 3-50 Histograma resultado de la simulación

Se escoge el 95% por ser un valor que puede mover en la mayoría de los casos. Este valor puede asegurarse hasta un 100% limitando el espacio de trabajo al que nos asegura ese 95%. Previsiblemente, el 5% restante son los puntos más alejados del centro del espacio de trabajo.

### 3.6.4 Estudio por elementos finitos

Tras los resultados de carga obtenidos, es interesante realizar una serie de simulaciones de estrés de la estructura y análisis de tensiones para los valores dados. Tomando las cargas obtenidas en el apartado 3.6.3 como referencia, se realizan una serie de simulaciones para distintas partes de la plataforma.

Para realizar un estudio completo y detallado, se realizará un estudio dividiendo en dos partes la plataforma. El principal motivo es poder realizar un ajuste más detallado de la malla y la estructura.

Se ha de tener claro que estos análisis comprueban la resistencia de la plataforma con unas cargas exactas y unos anclajes perfectos, muy alejado de la realidad. Se puede obtener una buena aproximación del comportamiento de los materiales a grandes esfuerzos, sin embargo, esto no asegura que la plataforma al completo soporte lo mismo. La plataforma ensamblada puede contener nuevos grados de libertad producidos por las holguras o simplemente uniones imperfectas, que pueden provocar el colapso o rotura.

Para evitar el desequilibrio de las cargas o los momentos provocados por los errores de precisión, es por tanto necesario procurar evitar todo tipo de holguras en las articulaciones y juntas de unión.

#### 3.6.4.1 Efecto y brazos metálicos

Se realizan fijando la parte más baja de los brazos, de esta manera, obtendríamos que pasaría si los servos se comportan como está previsto.



**Figura 3-51 Cargas de la simulación**



**Figura 3-52 Restricciones de la simulación**

Tomando como valor de la carga el máximo valor que los servos pueden mover, se realiza un estudio de los esfuerzos que sufre la estructura.

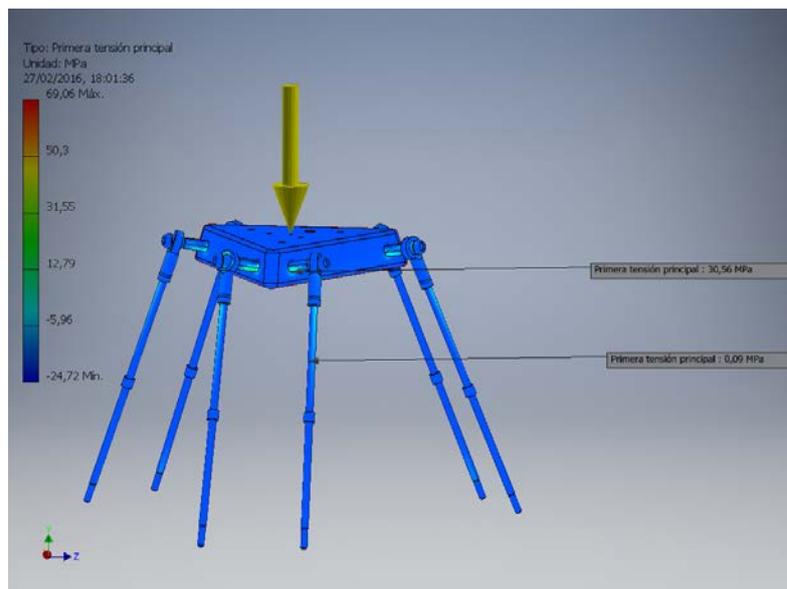
El informe generado por Inventor para una fuerza de 20 Kg arroja el siguiente resultado:

**Fuerza y pares de reacción en restricciones**

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:2	197,2 N	0 N	0,0804918 N m	-0,0513728 N m
		197,2 N		-0,0619658 N m
		0 N		0 N m

**Resumen de resultados**

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	85081,6 mm <sup>3</sup>	
Masa	0,0846096 kg	
Tensión de Von Mises	0,000132341 MPa	161,179 MPa
Primera tensión principal	-24,7167 MPa	69,0572 MPa
Tercera tensión principal	-169,378 MPa	23,6697 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0967799 mm
Coefficiente de seguridad	0,641521 su	15 su



**Figura 3-53 Tensión principal**

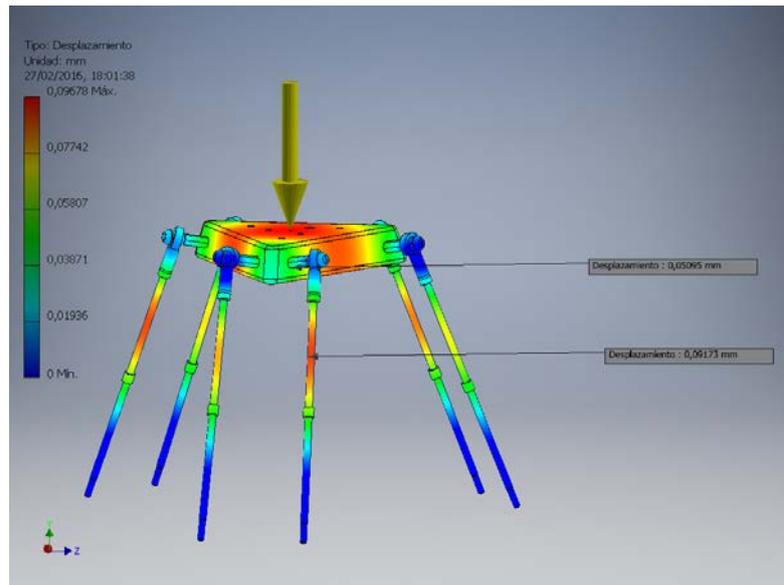


Figura 3-54 Desplazamiento

Los mayores esfuerzos se observan en las uniones del efector al separador y en los brazos metálicos a las zonas cercanas a la rótula. Los resultados niegan la posibilidad de pandeo o rotura. Se observa que todas las tensiones y parámetros se encuentran dentro de los valores permitidos.

El coeficiente de seguridad (Figura 3-52) es el mejor método para hacerse una idea de la situación a la que se enfrenta la plataforma con un peso de 20 kg.

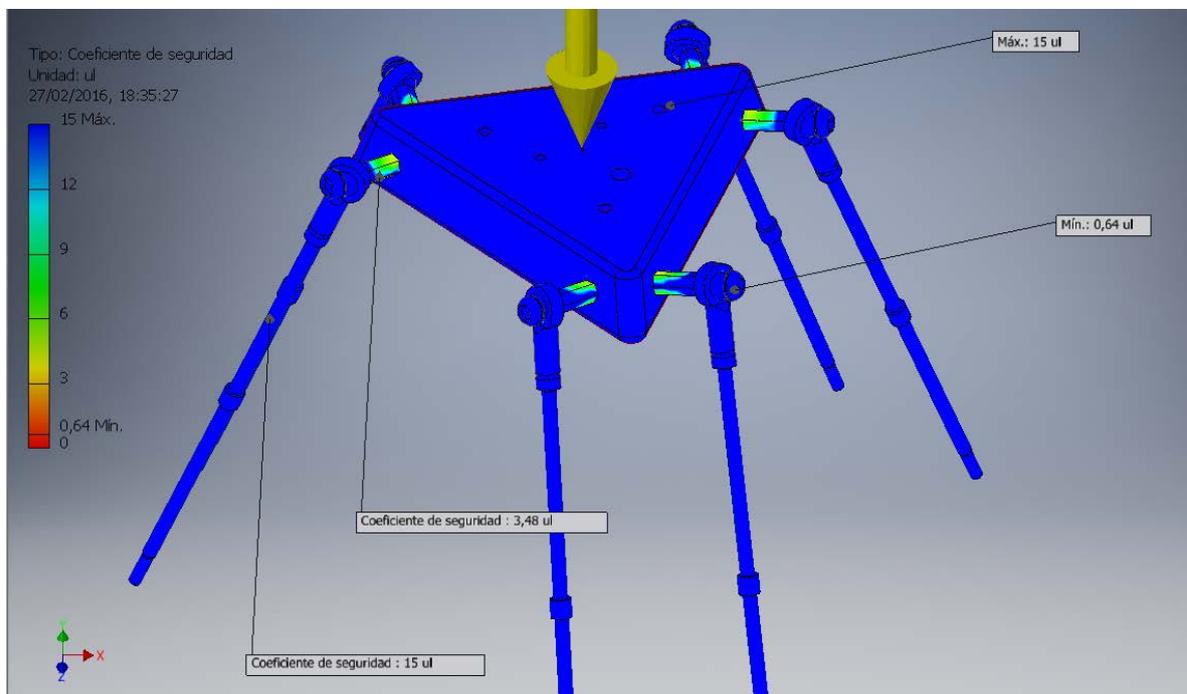


Figura 3-55 Coeficiente de seguridad

La simulación completa en el Anexo IV: Simulaciones estructurales.

### 3.6.4.2 Servos y base

Se repiten los ensayos con una carga de 20 kg uniformemente distribuida imitando las reacciones obtenidas en la simulación anterior.



Figura 3-56 Cargas

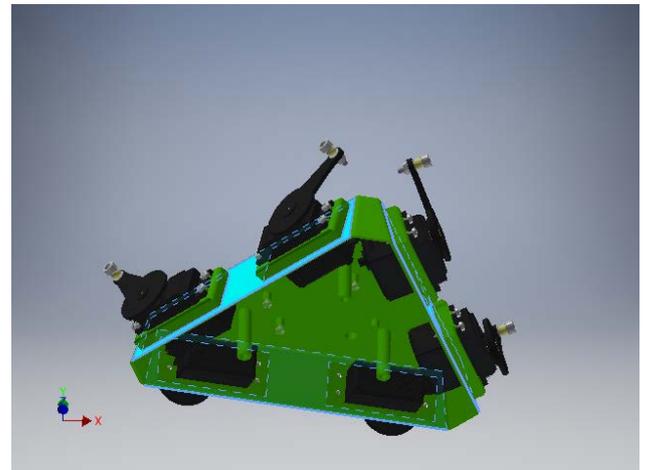


Figura 3-57 Restricciones

El informe generado por Inventor para una fuerza de 20 Kg arroja el siguiente resultado:

#### Fuerza y pares de reacción en restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	32,6 N	0 N	0,396617 N m	0,262717 N m
		32,6 N		-0,00700063 N m
		0 N		0,297044 N m

#### Resumen de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	242806 mm <sup>3</sup>	
Masa	0,222838 kg	
Tensión de Von Mises	0 MPa	169,623 MPa
Primera tensión principal	-16,272 MPa	123,903 MPa
Tercera tensión principal	-135,998 MPa	16,5882 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,112953 mm
Coefficiente de seguridad	1,22035 su	15 su
Desplazamiento X	-0,0759238 mm	0,0668503 mm
Desplazamiento Y	-0,0669926 mm	0,0167927 mm
Desplazamiento Z	-0,0823197 mm	0,0669652 mm

Deformación equivalente	0 su	0,00119789 su
-------------------------	------	---------------

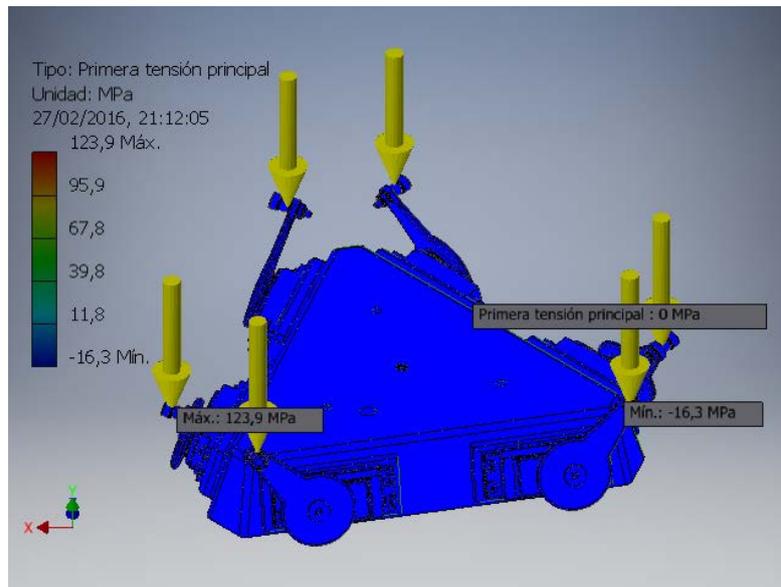


Figura 3-58 Tensión principal

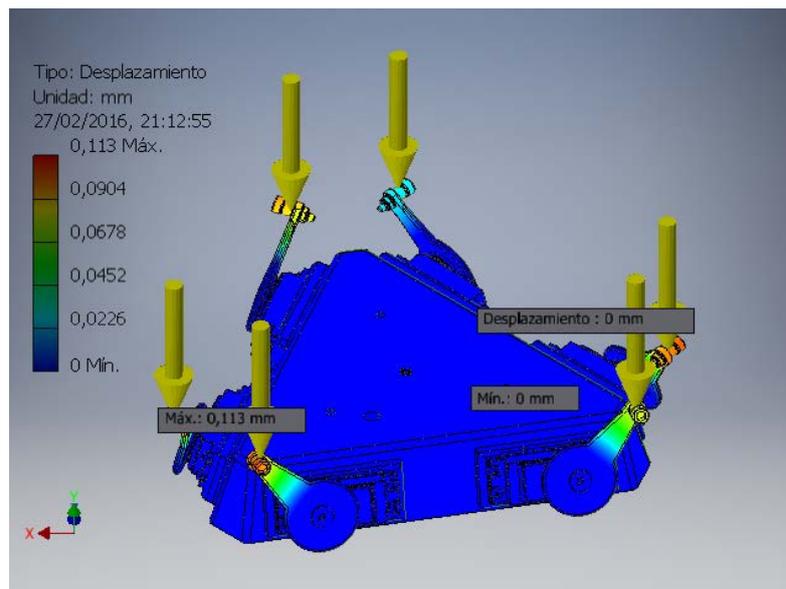
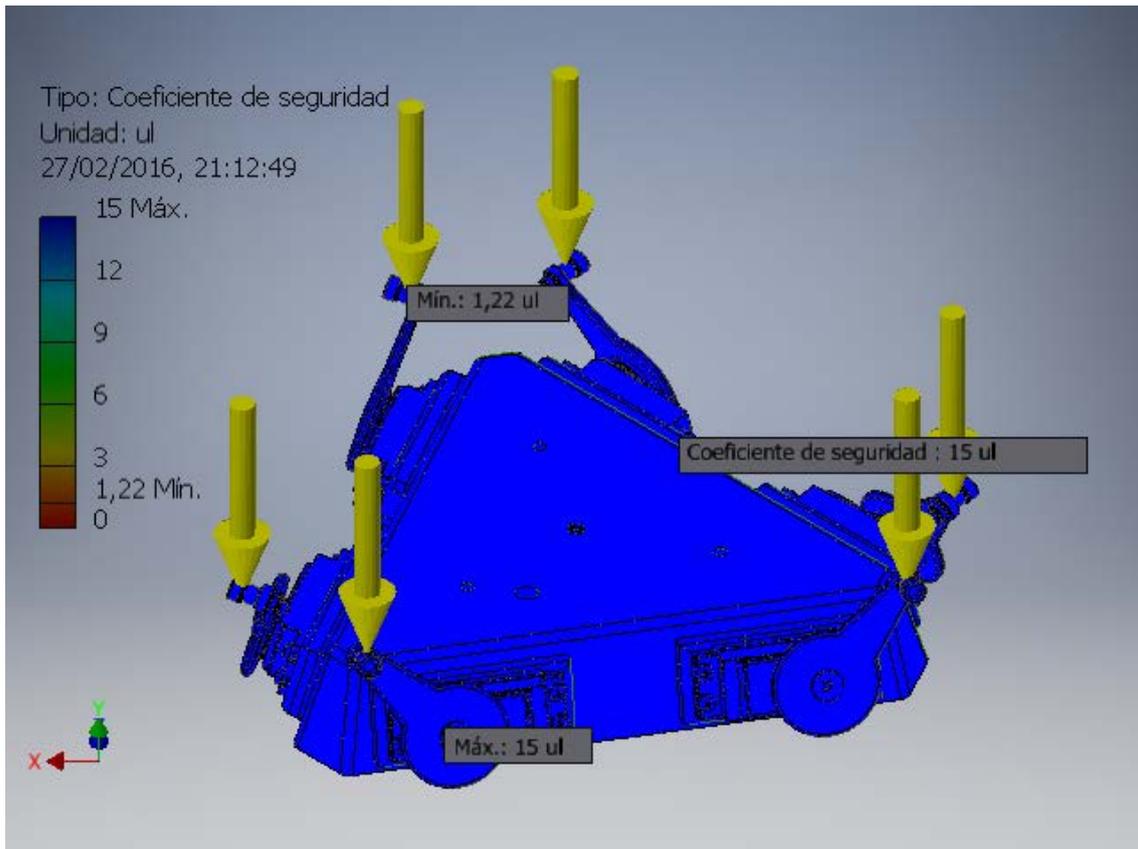


Figura 3-59 Desplazamiento

Se observa que no existe lugares críticos. La estructura soporta perfectamente una carga de 20 kg. Se observa mejor en el la visión de coeficientes de seguridad (Figura 3-57).



**Figura 3-60 Coeficiente de seguridad**

Simulación completa en el anexo Anexo IV: Simulaciones estructurales

### 3.6.5 Resultados y conclusiones

El resultado final del diseño y las simulaciones es una plataforma Stewart-Gough con las siguientes características:

<b>Simulación de cargas de trabajo</b>	
<b>Grados de Libertad</b>	6 DOF
<b>Comunicación</b>	Puerto Serial USB
<b>Programa de control</b>	MATLAB
<b>Alimentación</b>	6 V
<b>Fuerza media</b>	14.78 Kg
<b>Fuerza asegurada</b>	8.8 Kg
<b>Ancho máximo del espacio de trabajo</b>	200 mm
<b>Altura máxima del espacio de trabajo</b>	90 mm

**Figura 3-61 Características técnicas**

Aun así, para comprobar los resultados es necesario realizar una serie de ensayos que aseguran los datos obtenidos.

## 4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

### 4.1 Introducción

En este apartado se realizan una serie de ensayos con objeto de validar los resultados y obtener las especificaciones finales de la plataforma Stewart. Al final se realiza una validación y se exponen los resultados.

### 4.2 Ensayos

#### 4.2.1 Ensayo de espacio de trabajo

Se pueden realizar una simulación paso a paso de los posibles puntos máximos que puede alcanzar el robot, incluso recorrer todos paso a paso. Su verificación se realiza superponiendo ambos los datos obtenidos por simulación y los ensayados.

En este ensayo utiliza un bolígrafo para dibujar la longitud máxima que permite la plataforma Stewart. Midiendo la longitud alcanzada se consigue una estimación del área de trabajo y se compara con la obtenida mediante simulación.

Se presenta ahora los datos obtenidos:

Altura	Simulación		Ensayo		Error absoluto
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
50	-2,6	2,65	-4	5	4
40	-34,5	34,5	-35	37	2
30	-50,41	50,41	-51	53	4
20	-66,33	66,33	-67	69	3
10	-76,94	76,94	-79	79	3
0	-82,24	82,24	-83	85	3
-10	-92,86	92,86	-94	95	4
-20	-98,16	98,16	-100	101	3
-30	82,24	103,5	81	106	3
-40	103,5	108,8	102	111	3

Tabla 4-1 Resultados del ensayo espacio de trabajo XZ

Al comparar los datos ensayados con los datos que surgen de los obtenidos por simulación, se puede comprobar que los valores obtenidos son ligeramente superiores. La posible explicación es el tamaño de los parches de la trama que se utilizaron en la simulación. Eso porque los error obtenidos están confinados a 4 milímetros como mucho, y también porque los errores son superiores a los valores que se esperaban.

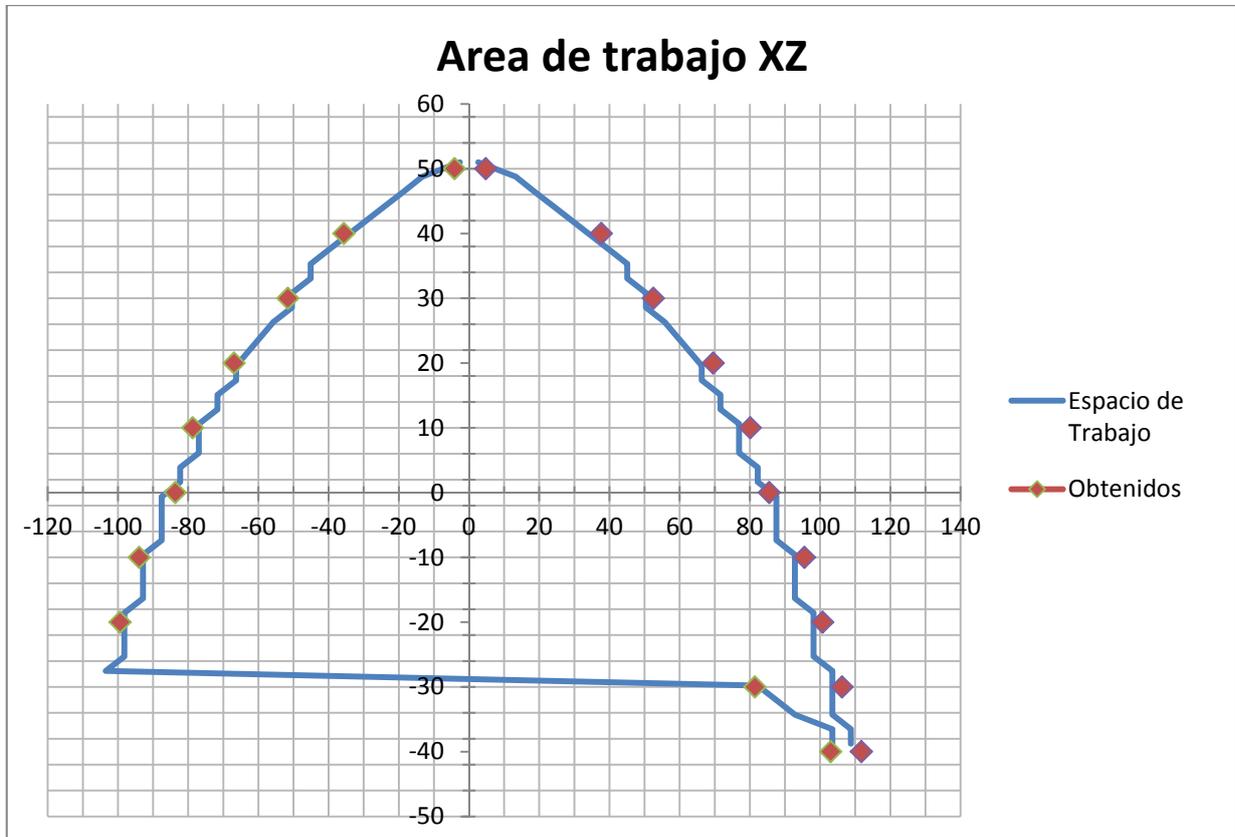


Figura 4-1 Posiciones simuladas y ensayadas XZ

Los resultados se repiten para YZ:

Altura	Simulación		Ensayo		Error absoluto
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
50	-2,9	2,95	-4	6	4
40	-34,8	34,8	-35	37	3
30	-50,72	50,72	-51	53	3
20	-66,61	66,63	-68	68	3
10	-77,25	77,25	-79	80	5
0	-82,54	82,54	-83	85	3
-10	-93,17	93,14	-94	95	3
-20	-98,46	98,47	-99	101	3
-30	0	0	0	0	0
-40	0	0	0	0	0

Tabla 4-2 Resultados espacio de trabajo YZ

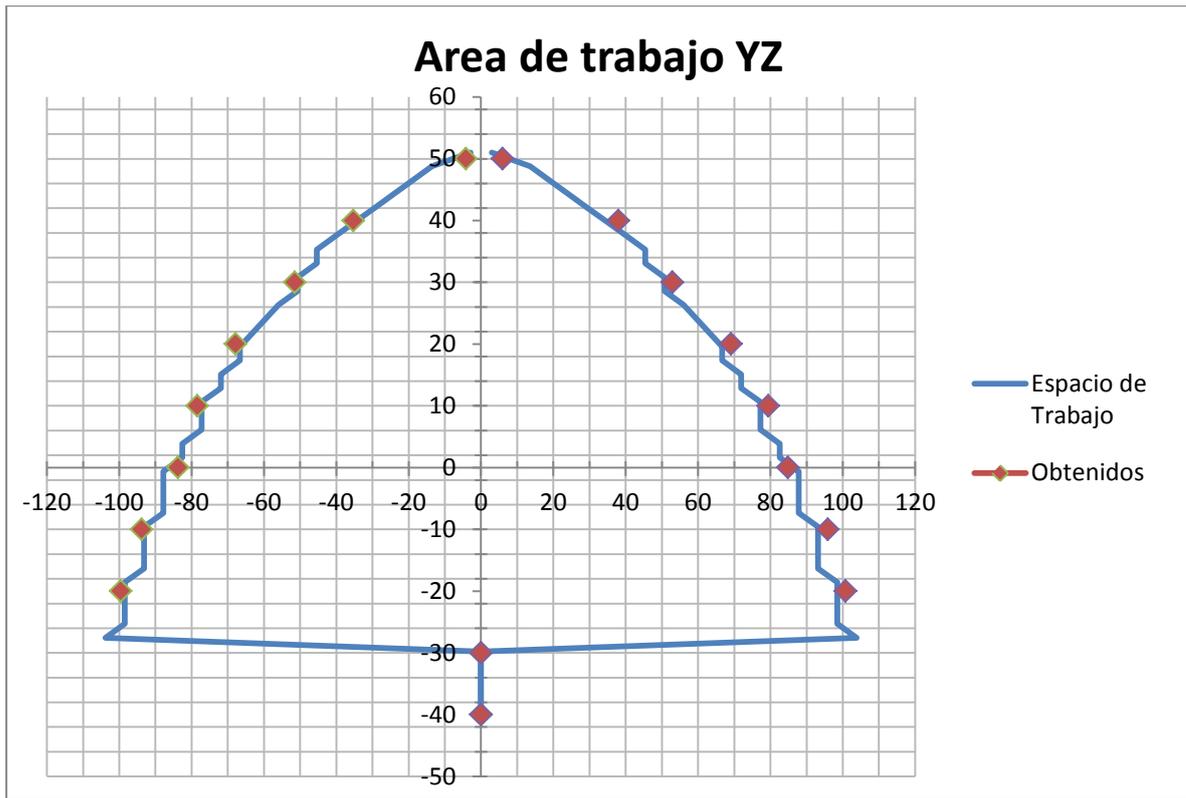


Figura 4-2 Posiciones simuladas y ensayadas YZ

Los resultados obtenidos se pueden considerar los suficientemente buenos como para afirmar que la simulación como exacta. Su precisión varía según el tamaño de la malla que se utiliza, en este caso, de aproximadamente 1.5 milímetros de media, y el tamaño de la malla es de 1.68 mm. El resto de errores se explica mediante los errores sistemáticos producidos en la medición.

#### 4.2.2 Ensayo de cargas

El ensayo de cargas se realiza mediante la adición de pesos al robot hasta obtener su punto crítico por error de posición. Cuando el servo está forzado, debe llegar a un punto crítico donde le resulte imposible conseguir mantener la posición. Se evaluará también el comportamiento estructural, la otra limitación a la carga posible.

Este test es muy subjetivo, pues el punto donde se fuerza los servos y la estructura se evalúa según el comportamiento que muestran los actuadores, la suma de la desviación de la posición y el sonido emitido por los motores del servo.

Cargas (kg)	Estructura	Servos
0,33	Aguanta	Funcionamiento correcto
0,66	Aguanta	Funcionamiento correcto
1,00	Aguanta	Funcionamiento correcto
1,33	Aguanta	Funcionamiento correcto
1,66	Aguanta	Funcionamiento correcto
2,00	Aguanta	Funcionamiento correcto

2,33	Aguanta	Funcionamiento correcto
2,66	Aguanta	Funcionamiento correcto
3,00	Aguanta	Funcionamiento correcto
4,00	Aguanta	Funcionamiento correcto
4,33	Aguanta	Funcionamiento correcto
4,66	Aguanta	Funcionamiento correcto
5,00	Aguanta	Funcionamiento correcto
5,33	Aguanta	Funcionamiento correcto
5,66	Zona elástica	Funcionamiento correcto
6	Zona elástica	Funcionamiento correcto
6,33	Zona elástica	Funcionamiento correcto
6,66	Zona elástica	Colapso

Tabla 4-3 Ensayo de cargas

El límite de la plataforma se alcanza con el colapso de los servos que se estima entre los 6,33 Kg y los 6,66 Kg. El colapso se produce al bloquearse un actuador sin previo aviso al no poder levantar la carga requerida.

Tomándose el punto medio de 6,5 Kg como punto crítico y comparándolo con los 8,8 Kg obtenidos en la simulación, se observa un error relativo del 26%. Este error en los cálculos puede deberse principalmente a una razón: la utilización de una fuente de 6 V en lugar de una de 7.2 V. Esta diferencia de potencial puede producir el déficit de fuerza motriz que condicionan los resultados.

Se puede sustituir sin problema la fuente de alimentación actual por una mayor de 7.2 V sin comprometer al resto del diseño.

Para las especificaciones técnicas del diseño se utilizará el resultado obtenido en este ensayo.

Analizando el comportamiento de la estructura también se puede extraer conclusiones. Se alcanza un punto donde comienza a producirse una flexión en los brazos de los servos. Este punto de flexión tan bajo en comparación con los obtenidos por simulación se debe a dos motivos principalmente:

- Holgura en las articulaciones y ensamblajes: Los ajustes fijos y móviles tiene cierta holgura, en especial las rótulas, que agregan un componente de libertad extra a la plataforma. La suma de todas ellas provocan una gran imprecisión en la estructura final que desequilibra la fuerza total aumentando el momento torsor en los brazos de los servos.
- Mala calidad de los elementos impresos: La baja densidad de los elementos impresos, en especial los brazos del servo, dotan de una flexibilidad no deseable a la plataforma cuyos efectos hay que sumar a los anteriores.

Estos motivos son los que principalmente provocan la flexión prematura de los brazos.

El resto de la estructura permanece inalterable. Puede considerarse por tanto que se obtiene unos resultados satisfactorios.

### 4.2.3 Ensayo de velocidad

La plataforma permite ordenar al efector ubicarse en distintos puntos del espacio en dos sentencias distintas separadas un tiempo determinado. Es claro que si el tiempo es lo suficientemente grande, el efector llegará sin problema a la posición ordenada, sin embargo, si la separación de estas órdenes se realizan en un tiempo menor al necesario, la carrera nunca llegará a completarse.

Conociendo el tiempo entre las órdenes y el tamaño de la carrera, podemos obtener la velocidad buscada. El tiempo lo imponemos nosotros, solo es necesario realizar mediciones de distancia para distintos tiempos.

El incremento de longitud de carrera varía linealmente con el tiempo, con lo que una regresión lineal debe devolver la velocidad máxima y el retardo.

Tiempo (s)	Distancia obtenida (mm)
0,08	41
0,1	53
0,12	64
0,14	77
0,16	88
0,18	100
0,2	114
0,22	125
0,24	139
0,26	150
0,28	162
0,3	167

Tabla 4-4 Datos obtenidos

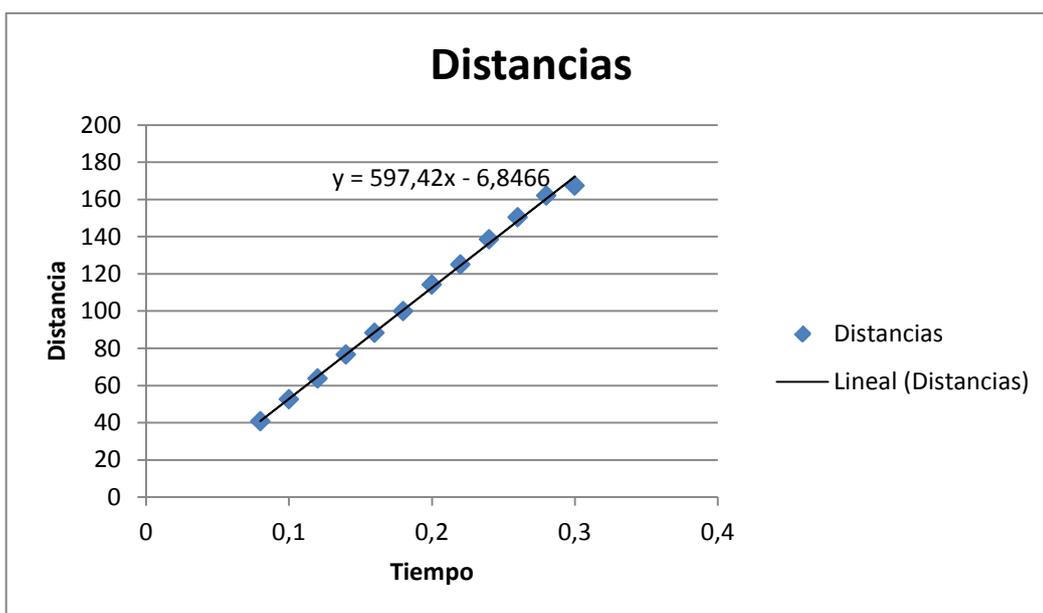


Figura 4-3 Gráfico de distancias obtenidas

Una vez se consigue la regresión lineal de los datos obtenidos, se compara con las ecuaciones que relaciona la distancia, el tiempo y la velocidad y se obtiene la velocidad.

$$d = v \times t + d_0 \tag{4-1}$$

Se tiene  $v=0,597\text{m/s}$ . Este valor es parecido al valor medio obtenido por simulación. Entre los dos valores, este es más plausible.

### 4.3 Resultados

Después de realizar los ensayos, se tiene que la plataforma Stewart responde a estas características:

<b>Especificaciones técnicas ensayadas</b>	
<b>Fuerza</b>	6,5 Kg
<b>Velocidad</b>	0,597 m/s
<b>Ancho máximo del espacio de trabajo</b>	201 mm
<b>Altura máxima del espacio de trabajo</b>	90 mm

**Tabla 4-5 Características técnicas ensayadas**

Los resultados obtenidos varían ligeramente a los obtenidos en el diseño, a excepción de la fuerza máxima soportada, cuya diferencia es más notable y produce el colapso de la plataforma de forma no prevista anteriormente.

Estos valores describen a una plataforma 6 DOF capaz de mover con libertad un peso de 6,5 Kg en un espacio de hasta 20 cm, y con una buena velocidad de trabajo.

Los valores obtenidos describen el prototipo de una plataforma Stewart totalmente funcional, con unas capacidades dignas para el coste final del prototipo.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Descripción del apartado

En este apartado se recapacita acerca del desarrollo del proyecto y futuras líneas de investigación, desarrollo y utilidad de la plataforma Stewart-Gough.

### 5.2 Objetivos alcanzados

Se han alcanzado todos los objetivos propuestos al inicio del proyecto y diseñado la plataforma Stewart-Gough totalmente funcional y de bajo costo. Se ha optimizado y se puede utilizar sin problema para realizar recreaciones de grabaciones, imitación de movimientos o ajustes programados.

En el transcurso del proyecto, se ha hecho un diseño y un estudio detallado del robot, ajustándolo a las necesidades requeridas para su construcción, y se han descrito con detalle los problemas y soluciones tomadas.

Se construido el robot siguiendo la metodología *Rapid Prototyping*, imprimiendo las piezas de la maquina en 3D como se tenía previsto y ajustando las dimensiones del robot a las limitaciones de la máquina. Las piezas obtenidas por este método han analizadas mediante simulaciones teóricas y ensayos reales.

Se ha propuesto un método alternativo de utilizar las matrices de rotación para obtener la solución exacta a la cinemática inversa del robot, utilizando el modelo creado en el software de control y en el análisis de la estructura. Además, se ha utilizado este modelo para obtener características técnicas de la plataforma mediante simulaciones en MATLAB con muy buenos resultados.

El resultado final es una plataforma prototipo que puede utilizarse en el estado actual de desarrollo, pero que mantiene una vía abierta de continuidad y sirve como inicio para el diseño de nuevos robots paralelos similares a este.

### 5.3 Lecciones aprendidas

Durante el desarrollo del proyecto se ha adquirido conocimientos y se ha hecho frente a dificultades que conviene tener presente en líneas futuras:

- Realizar un modelo matemático antes de diseñar el prototipo es sumamente útil, permitiendo conocer al detalle la muchos de las características tendrá el prototipo.
- La utilización del ordenador como unidad fundamental de cálculo tiene muchas ventajas respecto a computar con la electrónica bastante limitada de un Arduino UNO. Para manejar matrices de posiciones o realizar los cálculos en él es necesario un controlador más potente, por ejemplo, Arduino YUN.

- Las técnicas de diseño empleadas son muy potentes y eficaces, pero su mejora y optimización necesita de repeticiones y técnicas recursivas que exigen de bastante tiempo en comparación al tamaño del proyecto.
- La impresión 3D con máquinas convencional no se deben utilizar como herramienta de precisión. Así mismo, las piezas generadas varían mucho su rigidez y resistencia por la forma en que se imprime. A la hora de diseñar estas piezas, hay que tener también presente su comportamiento al ser impreso.
- Para ganar precisión, es necesario utilizar el mínimo número de elementos móviles. Así mismo, las juntas y uniones deben de tener el mayor ajuste posible, dejando la mínima libertad posible a la pieza.

## 5.4 Propuestas

La imaginación es el límite de este robot. Su potencial en el ámbito militar es grande, sobre todo en simuladores y estabilizadores. Se propone a continuación una serie de ideas que pueden ser llevadas a la práctica.

- Introducción de una matriz de calibración: se puede mejorar mucho la precisión de la plataforma si se corrige paso a paso las posiciones de la plataforma.
- Creación de un sistema automático de calibración basado en el uso de un giróscopo acoplado al efector.
- Creación de una GUI específica para la plataforma, mejorando la facilidad de uso.
- Continuar con el proyecto e introducir un giróscopo para mejorar su precisión.
- Escalar la plataforma a un robot similar 6DOF, pero con una estructura similar al robot DELTA [12] y actuadores hidráulicos aprovechando el trabajo realizado en este proyecto.

De igual forma, se introducen nuevos usos para este robot:

- Utilización de plataformas similares para orientar paneles solares. Útil para la creación de parking solares.
- Uso de la plataforma como sistema de orientación de una base de aterrizaje de drones [20]. Es una solución óptima por la capacidad de carga y la capacidad de orientación del robot. Además, el uso de un ordenador independiente puede interconectar al dron con la plataforma mediante wifi.
- Creación de una plataforma móvil para el simulador de tiro. Se puede reproducir el movimiento de un barco para entrenar a la infantería en el tiro de precisión.
- Creación de plataformas y soportes para elementos sensibles que corrijan los movimientos a bordo de los buques mediante la estimación del cabeceo y escora.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. E. Gough, «Contribution to discussion of papers on research in Automobile Stability, Control and Tyre performance,» *Proc. Automobile Division Institution of Mechanical Engineers*, pp. 392-394, 1956–1957.
- [2] People Daily Online, «La primera fábrica sin trabajadores de China toma forma en la ciudad de Dongguan,» *People Daily Online*, 16 Julio 2015.
- [3] L. Ángel Silva, *Control visual de robots paralelos. Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis.*, Madrid, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [4] D. Stewart, «A Platform with Six Degrees of Freedom,» Frimley, Hampshire, 1965.
- [5] K. H. Hunt, «Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms,» *Trans., and Automation 105(4)*, pp. 705-712, 01 Dec 1983.
- [6] C. Earl y J. Rooney, «Some kinematic structures for robot manipulator designs,» *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design* *Journal of Mechanisms*, vol. 105, nº 1, pp. 15-22, 1983.
- [7] The MathWorks, Inc, «MathWorks,» 10 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.mathwork.com>.
- [8] O. Bohigas, M. Manubens y L. Ros, «A Linear Relaxation Method for Computing Workspace Slices of the Stewart Platform,» *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 1, nº 5, p. 9, 28 Julio 2011.
- [9] D. Ku, «Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 3, nº 34, pp. 453-465, 1999.
- [10] E. Hernández-Martínez, S. Valdez-Peña y E. Sánchez-Soto, «Solución de la cinemática directa de la plataforma Gough-Stewart general usando un algoritmo híbrido de optimización,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, pp. 241-247, 2013.
- [11] Fundación Fatronik, S.A. (Tecnalia), «Máquinas de cinemática paralela: implementación industrial y futuras tendencias,» 27 Noviembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/26569-Maquinas-de-cinemática-paralela->

- implementacion-industrial-y-futuras-tendencias.html. [Último acceso: 13 Febrero 2016].
- [12] R. Clavel, «Delta, a fast robot with parallel geometry,» *Proc. 18th Int. Symp. on Industrial Robots*, pp. 91-100, 1988.
- [13] Pontificia Universidad Católica del Perú, «Invento desarrollado en la PUCP para el tratamiento de personas con discapacidades motrices,» 27 marzo 2012. [En línea]. Available: <http://puntoedu.pucp.edu.pe/noticias/invento-desarrollado-en-la-pucp-para-el-tratamiento-de-personas-con-discapacidades-motrices/>. [Último acceso: 13 Febrero 2016].
- [14] N. X. González Alvarez, E. P. Reinoso Mendoza y E. Calle Ortiz, *Estudio, diseño y construcción de una plataforma robótica didáctica tipo Stewart aplicada al estudio de controladores difusos*, Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2011.
- [15] W. R. Hamilton, *Lectures on quaternions*, 1853.
- [16] F. L. Lewis, C. T. Abdallah y D. M. Dawson, *Control of robot manipulators*, New York: Macmillan, 1993.
- [17] Serdar Kucuk, *Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Control and Optimization*, InTech, 2012.
- [18] Make It From, «MakeItFrom.com,» [En línea]. Available: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Poly lactide/>. [Último acceso: 19 Febrero 2016].
- [19] M. S. Hernán González, «www.catic.unab.edu.com,» 2006. [En línea]. Available: <http://catic.unab.edu.co/2congresomecatronica/images/docum/14.pdf>. [Último acceso: 28 Febrero 2011].
- [20] J. M. Liaño Cuquerella, «Desarrollo de un sistema de control UAV con capacidad ATOL,» Marín, Pontevedra, 2016.
- [21] K. Čapek, *Rossum's Universal Robots*, Praga, 1921.
- [22] Fuji Yusoki Kogyo Co, «Fuji Yusoki Kogyo Co,» [En línea]. Available: <http://www.fujiyusoki.com/English/rekishi.htm>. [Último acceso: 5 Febrero 2016].
- [23] F. M. Sánchez-Martín, P. Jiménez Schlegl, F. Millán Rodríguez, J. Salvador-Bayarri, V. Monllau Font, J. Palou Redorta y H. Villavicencio Mavrich, «Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci (Parte II),» *Actas urológicas españolas*, vol. 31, nº 3, pp. 185-196, 2007.
- [24] A. M. Turing, «Computing machinery and intelligence,» *Mind*, p. 59, 1950.



# ANEXO I: CÓDIGO MAESTRO MATLAB

## Maestro

```

%--SETUP y VARIABLES--

Setting();
%-Variables-
Variables()

%controladores del loop principal
Programa_activo=true;
Enviar=true;
Concatenar=true;
Comprobar_tiempo=true;
Representar_COM=false;

fclose('all');
delete(instrfind({'Port'},{PUERTO_SERIAL}));
arduino=serial(PUERTO_SERIAL,'BaudRate',BAUD_RATE);
fopen(arduino);
contador=0;

%--BUCLE CONSTANTE DEL PROGRAMA--

while(Programa_activo)
%OBTENER POSICIONES Y ORDENES

M_A=[sin(now*30e4)*0,sin(now*30e4)*0,0,0,sin(now*30e4)*40,sin(now*15e4)*0];

%Matriz a calcular
%comprobar_tiempo=false;

M_anterior=M;
%Nos aseguramos de escoger la solución mas cercana
%M queda multiplicada por 10, aumentado la resolución y eliminando la coma
%flotante. Arduino debe entenderlo

for i=1:1:6
    if ((-1)^i<0)
        if (solucion_grados(i,1)<=LIM_MAX_IMP || solucion_grados(i,1)>=LIM_MIN_IMP)
            solucion_grados(i,2)=solucion_grados(i,1);
        end
    else
        if(solucion_grados(i,1)<=LIM_MAX_PAR || solucion_grados(i,1)>=LIM_MIN_PAR)
            solucion_grados(i,2)=solucion_grados(i,1);
        end
    end

    if(abs(M_anterior(i)-solucion_grados(i,1)*10)<=abs(M_anterior(i)-solucion_grados(i,2)*10))
        M(i)=round(solucion_grados(i,1)*10);
    else
        M(i)=round(solucion_grados(i,2)*10);
    end
    if ((-1)^i<0)
        M(i)=3600-M(i);
    end
end

%Corregir
M=-M*VARIACION_ANGULOS+CORRECCION_ANGULOS;

%ENVIAR POSICIONES MEDIANTE PROTOCOLO DEFINIDO
%Concatenar String
if(Concatenar)
    Signal='';
    if(M(1)~=SolucionesServos(1))
        Signal=strcat(Signal,TOKEN,'S1:',num2str(round(M(1))));
        SolucionesServos(1)=M(1);
    end
    if(M(2)~=SolucionesServos(2))
        Signal=strcat(Signal,TOKEN,'S2:',num2str(round(M(2))));

```

```

        SolucionesServos(2)=M(2);
    end
    if(M(3)~=SolucionesServos(3))
        Signal=strcat(Signal,TOKEN,'S3:',num2str(round(M(3))));
        SolucionesServos(3)=M(3);
    end
    if(M(4)~=SolucionesServos(4))
        Signal=strcat(Signal,TOKEN,'S4:',num2str(round(M(4))));
        SolucionesServos(4)=M(4);
    end
    if(M(5)~=SolucionesServos(5))
        Signal=strcat(Signal,TOKEN,'S5:',num2str(round(M(5))));
        SolucionesServos(5)=M(5);
    end
    if(M(6)~=SolucionesServos(6))
        Signal=strcat(Signal,TOKEN,'S6:',num2str(round(M(6))));
        SolucionesServos(6)=M(6);
    end
    Signal=strcat(Signal);
    SolucionesServos=M(:,1);

end

%Comprobar momento idoneo para enviar
if(Comprobar_tiempo)
    Concatenar=false;
    if(now-ENVIIO_DATOS>=ultimo_envio)
        enviar=true;
        ultimo_envio=now;
    end
else
    enviar=true;
end

%Enviar String
if(enviar && comprobacion==true)
    fprintf(arduino,Signal);
    disp(Signal);
    solucion_grados
    %Reinicio del bucle
    Signal='';
    Orden='';
    enviar=false;
    Concatenar=true;
    disp(contador);
    contador=contador+1;
end

if(Representar_COM)
    disp(fscanf(arduino));
end

end

```

## Setting.m

```

CENTRO_PEANA=0;
CENTRO_BASE=-136.3240;
RADIO_PEANA=57.657;
RADIO_BASE=103.828;
RADIO_VARILLA=154.993;
RADIO_SERVO=40;
ANGULOS_BASE=2*pi/360*[25.828404,94.141652,145.828404,214.141652,265.828404,334.141652];
ANGULOS_PEANA=2*pi/360*[21.678961,98.321039,174.963117,196.642078,273.284156,349.926234];
ANGULOS_SERVOS=(pi/180)*[30,30,270,270,150,150];
CORRECCION_ANGULOS=[608;595;580;590;585;620];
VARIACION_ANGULOS=94/600;
LIM_MAX_IMP=60;
LIM_MAX_PAR=240;
LIM_MIN_IMP=200;
LIM_MIN_PAR=200;

%%CONECTIVIDAD
PUERTO_SERIAL='COM9';

```

```

BAUD_RATE=115200;
ENVIO_DATOS=datenum([0 0 0 0 0 0.1]);
TOKEN='$';

%%CALCULO DE LOS NODOS
NodosPeana=zeros(6,3);
NodosBase=zeros(6,3);
for i=1:6
    NodosPeana(i,:)=[RADIO_PEANA*cos(ANGULOS_PEANA(i)) RADIO_PEANA*sin(ANGULOS_PEANA(i)) CENTRO_PEANA];
    NodosBase(i,:)=[RADIO_BASE*cos(ANGULOS_BASE(i)) RADIO_BASE*sin(ANGULOS_BASE(i)) CENTRO_BASE];
end

```

## Soluciones.m

```

alpha=M_A(1); beta=M_A(2); gamma=M_A(3); V_x=M_A(4); V_y=M_A(5); V_z=M_A(6);

%%Matrices de cambio
Rz=[cos(alpha) -sin(alpha) 0; sin(alpha) cos(alpha) 0; 0 0 1];
Ry=[cos(beta) 0 sin(beta); 0 1 0; -sin(beta) 0 cos(beta)];
Rx=[1 0 0; 0 cos(gamma) -sin(gamma); 0 sin(gamma) cos(gamma)];
Rzyx=Rz*Ry*Rx;

%%Giro de los nodos y posicion final
PosNodosFinal_congiro=NodosPeana*Rzyx;
Traslacion=[ones(1,6).*V_x;ones(1,6).*V_y;ones(1,6).*V_z]';
PosNodosFinal=PosNodosFinal_congiro+Traslacion;

for i=1:6
    %%Giro del nodo pertinente superior respecto al plano del servo
    alpha=-ANGULOS_SERVOS(i); beta=0; gamma=15/180*pi;

    %%Matrices de cambio
    Rz=[cos(alpha) -sin(alpha) 0; sin(alpha) cos(alpha) 0; 0 0 1];
    Rx=[1 0 0; 0 cos(gamma) -sin(gamma); 0 sin(gamma) cos(gamma)];
    Rzx=Rz*Rx;

    PosMovPlano=PosNodosFinal(i,:)-NodosBase(i,:); %traslado del nodo base al centro
    PosGiroPlano(i,:)=PosMovPlano*Rzx; %Rotacion de 15 grados

    x_corte=PosGiroPlano(i,1);
    y_corte=PosGiroPlano(i,2);
    z_corte=PosGiroPlano(i,3);
    r_corte=sqrt(RADIO_VARILLA^2-PosGiroPlano(i,2)^2);

    %%El problema se traduce a obtener la solución de corte de dos circulos en
    %%2d. En la libreta la resolucion
    L=sqrt(x_corte^2+z_corte^2);
    r=sqrt(RADIO_VARILLA^2-y_corte^2);
    y_0=z_corte;
    x_0=x_corte;
    r=RADIO_SERVO;
    R=r_corte;
    x1=(y_0*((- R^2 + 2*R*r - r^2 + x_0^2 + y_0^2)*(R^2 + 2*R*r + r^2 - x_0^2 - y_0^2))^(1/2) - R^2*x_0 +
    r^2*x_0 + x_0*y_0^2 + x_0^3)/(2*(x_0^2 + y_0^2));
    x2=(r^2*x_0 - R^2*x_0 - y_0*((- R^2 + 2*R*r - r^2 + x_0^2 + y_0^2)*(R^2 + 2*R*r + r^2 - x_0^2 -
    y_0^2))^(1/2) + x_0*y_0^2 + x_0^3)/(2*(x_0^2 + y_0^2));
    y1=sqrt(r^2-x1^2)*0-sqrt(R^2-(x1-x_0)^2)+y_0;
    y2=sqrt(r^2-x2^2)*0-sqrt(R^2-(x2-x_0)^2)+y_0;
    angul_par2=0;
    angul_par1=0;

    if x1>0
        if y1>0
            angul_par1=atan(abs(x1/y1));
        else
            angul_par1=pi-atan(abs(x1/y1));
        end
    else
        if y1>0
            angul_par1=2*pi-atan(abs(x1/y1));
        else
            angul_par1=pi+atan(abs(x1/y1));
        end
    end
end

```

```

if x2>0
    if y2>0
        angul_par2=atan(abs(x2/y2));
    else
        angul_par2=pi-atan(abs(x2/y2));
    end
else
    if y2>0
        angul_par2=2*pi-atan(abs(x2/y2));
    else
        angul_par2=pi+atan(abs(x2/y2));
    end
end

if ((-1)^i)<0
    solucion(i,:)=[+angul_par1 +angul_par2];
else
    solucion(i,:)=[+angul_par2 +angul_par1];
end

end

solucion_grados=(360/2/pi)*solucion;
servo=zeros(6,3);

for i=1:6
    Servo(i,:)=[NodosBase(i,1) NodosBase(i,2) NodosBase(i,3)];
    BO_alpha=ANGULOS_SERVOS(i); BO_beta=0; BO_gamma=-015/180*pi;
    BO_Rz=[cos(BO_alpha) -sin(BO_alpha) 0; sin(BO_alpha) cos(BO_alpha) 0; 0 0 1];
    BO_Ry=[cos(BO_beta) 0 sin(BO_beta); 0 1 0; -sin(BO_beta) 0 cos(BO_beta)];
    BO_Rx=[1 0 0; 0 cos(BO_gamma) -sin(BO_gamma); 0 sin(BO_gamma) cos(BO_gamma)];
    BO_Rxy=BO_Rx*BO_Rz;
    ValorServoGirado1=[RADIO_SERVO*sin(solucion(i,1)) 0 RADIO_SERVO*cos(solucion(i,1))]*BO_Rxy;
    ValorServoGirado2=[RADIO_SERVO*sin(solucion(i,1)) 0 RADIO_SERVO*cos(solucion(i,1))]*BO_Rxy;
    Servo1(i,:)=Servo(i,:)+ValorServoGirado1;
    Servo2(i,:)=Servo(i,:)+ValorServoGirado2;
    com(i,:)=[sqrt((Servo1(i,1)-PosNodosFinal(i,1))^2+(Servo1(i,2)-PosNodosFinal(i,2))^2+(Servo1(i,3)-
PosNodosFinal(i,3))^2)-RADIO_VARILLA sqrt((Servo2(i,1)-PosNodosFinal(i,1))^2+(Servo2(i,2)-
PosNodosFinal(i,2))^2+(Servo2(i,3)-PosNodosFinal(i,3))^2)-RADIO_VARILLA];

end

if(max(com)>1e-10)
    comprobacion=false;
else
    comprobacion=true;
end
end

```

## Variables.m

```

M=CORRECCION_ANGULOS; %[S1,S2,S3,S4,S5,S6] ;
Tiempo_Referencia=now; %Tiempo de referencia para el envio
ultimo_envio=Tiempo_Referencia; %Se utiliza como indice del vector
SolucionesServos=zeros(6,1);
solucion_grados=zeros(6,2);
angul_par2=0;
angul_par1=0;
PosGiroPlano=zeros(6,3);
servo=zeros(6,3);

```

## ANEXO II: CÓDIGO ESCLAVO ARDUINO

```

/*
Name:          Controlador.ino
Created:01/02/2016 9:16:42
Author: Jose Luis
*/

// Setup
#include <Servo.h>
/*Para evitar complicaciones de coma flotante, se utiliza x10
o lo que es lo mismo, 360 -> 3600. Ademas se utiliza la referencia de angulo
la posicion más baja del brazo para evitar el paso de 360º=000º */
#define MAX_ANGULO_PAR 1800
#define MAX_ANGULO_IMPAR 1800
#define MIN_ANGULO_PAR 0
#define MIN_ANGULO_IMPAR 0

String token = "$";
String Lectura_Serial;
String SubLectura_Indicador;
int SubLectura_Valor;
float Angulo_Servo_1;
float Angulo_Servo_2;
float Angulo_Servo_3;
float Angulo_Servo_4;
float Angulo_Servo_5;
float Angulo_Servo_6;
Servo Servo_1;
Servo Servo_2;
Servo Servo_3;
Servo Servo_4;
Servo Servo_5;
Servo Servo_6;
int index_1 = 0;
int index_2 = 0;
boolean Switch_debug = true;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.setTimeout(50);
  Servo_1.attach(3);
  Servo_2.attach(4);
  Servo_3.attach(5);
  Servo_4.attach(6);
  Servo_5.attach(7);
  Servo_6.attach(8);
}

// Funcion loop
void loop() {
  Leer_Serial();
  MoverServos();
  if (Switch_debug){
    Debug();
  }
}

//Funciones
void Leer_Serial(){
  //Esperamos leer algo de la forma: ... $S2:34.2345 $S3:23.2345
  Lectura_Serial = Serial.readString();
  index_1 = 0;
  index_2 = 0;
  while (Lectura_Serial.indexOf(token) != -1){
    index_1 = Lectura_Serial.indexOf(token);
    index_2 = Lectura_Serial.indexOf(token, index_1 + 1);
    SubLectura_Indicador = Lectura_Serial.substring(index_1 + 1, index_1 + 3);
    SubLectura_Valor = Lectura_Serial.substring(index_1 + 4, index_2).toFloat();
    if (SubLectura_Indicador == "S1"){
      Angulo_Servo_1 = SubLectura_Valor;
      if (Angulo_Servo_1 <= 1800){

```

```

        Angulo_Servo_1 + 1800;
    }
    else{
        Angulo_Servo_1 - 1800;
    }
}
if (SubLectura_Indicador == "S2"){
    Angulo_Servo_2 = SubLectura_Valor;
    if (Angulo_Servo_2 <= 1800){
        Angulo_Servo_2 + 1800;
    }
    else{
        Angulo_Servo_2 - 1800;
    }
}
if (SubLectura_Indicador == "S3"){
    Angulo_Servo_3 = SubLectura_Valor;
    if (Angulo_Servo_3 <= 1800){
        Angulo_Servo_3 + 1800;
    }
    else{
        Angulo_Servo_3 - 1800;
    }
}
if (SubLectura_Indicador == "S4"){
    Angulo_Servo_4 = SubLectura_Valor;
    if (Angulo_Servo_4 <= 1800){
        Angulo_Servo_4 + 1800;
    }
    else{
        Angulo_Servo_4 - 1800;
    }
}
if (SubLectura_Indicador == "S5"){
    Angulo_Servo_5 = SubLectura_Valor;
    if (Angulo_Servo_5 <= 1800){
        Angulo_Servo_5 + 1800;
    }
    else{
        Angulo_Servo_5 - 1800;
    }
}
if (SubLectura_Indicador == "S6"){
    Angulo_Servo_6 = SubLectura_Valor;
}
if (Angulo_Servo_6 <= 1800){
    Angulo_Servo_6 + 1800;
}
else{
    Angulo_Servo_6 - 1800;
}
if (SubLectura_Indicador == "D1"){
    Switch_debug = true;
}
if (SubLectura_Indicador == "D0"){
    Switch_debug = false;
}
Lectura_Serial = Lectura_Serial.substring(index_2);
}
}

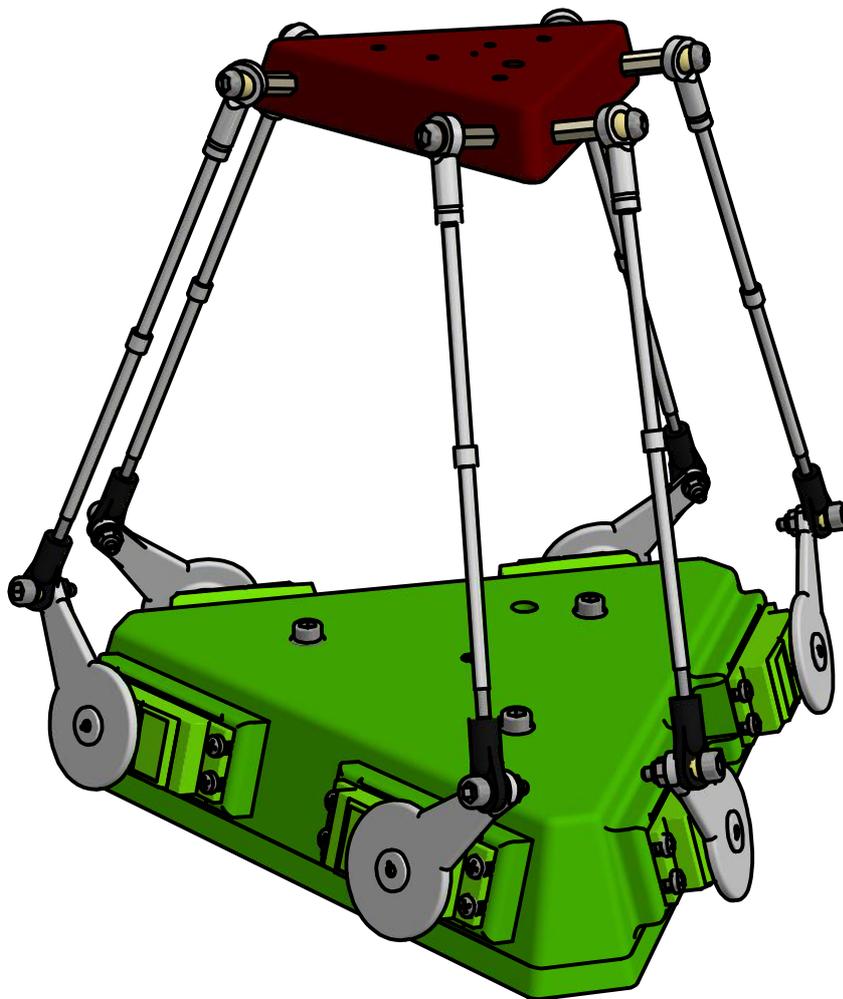
void MoverServos(){ //Lo utilizamos para actualizar la posición de los servos
    Servo_2.write(map(Angulo_Servo_2, 0, 1023, MIN_ANGULO_PAR, MAX_ANGULO_PAR));
    Servo_4.write(map(Angulo_Servo_4, 0, 1023, MIN_ANGULO_PAR, MAX_ANGULO_PAR));
    Servo_6.write(map(Angulo_Servo_6, 0, 1023, MIN_ANGULO_PAR, MAX_ANGULO_PAR));
    Servo_1.write(map(Angulo_Servo_1, 0, 1023, MIN_ANGULO_IMPAR, MAX_ANGULO_IMPAR));
    Servo_3.write(map(Angulo_Servo_3, 0, 1023, MIN_ANGULO_IMPAR, MAX_ANGULO_IMPAR));
    Servo_5.write(map(Angulo_Servo_5, 0, 1023, MIN_ANGULO_IMPAR, MAX_ANGULO_IMPAR));
}

void Debug(){
    Serial.print("Debug ");
    Serial.print(Angulo_Servo_1);
    Serial.print(' ');
    Serial.print(Angulo_Servo_2);
    Serial.print(' ');
}

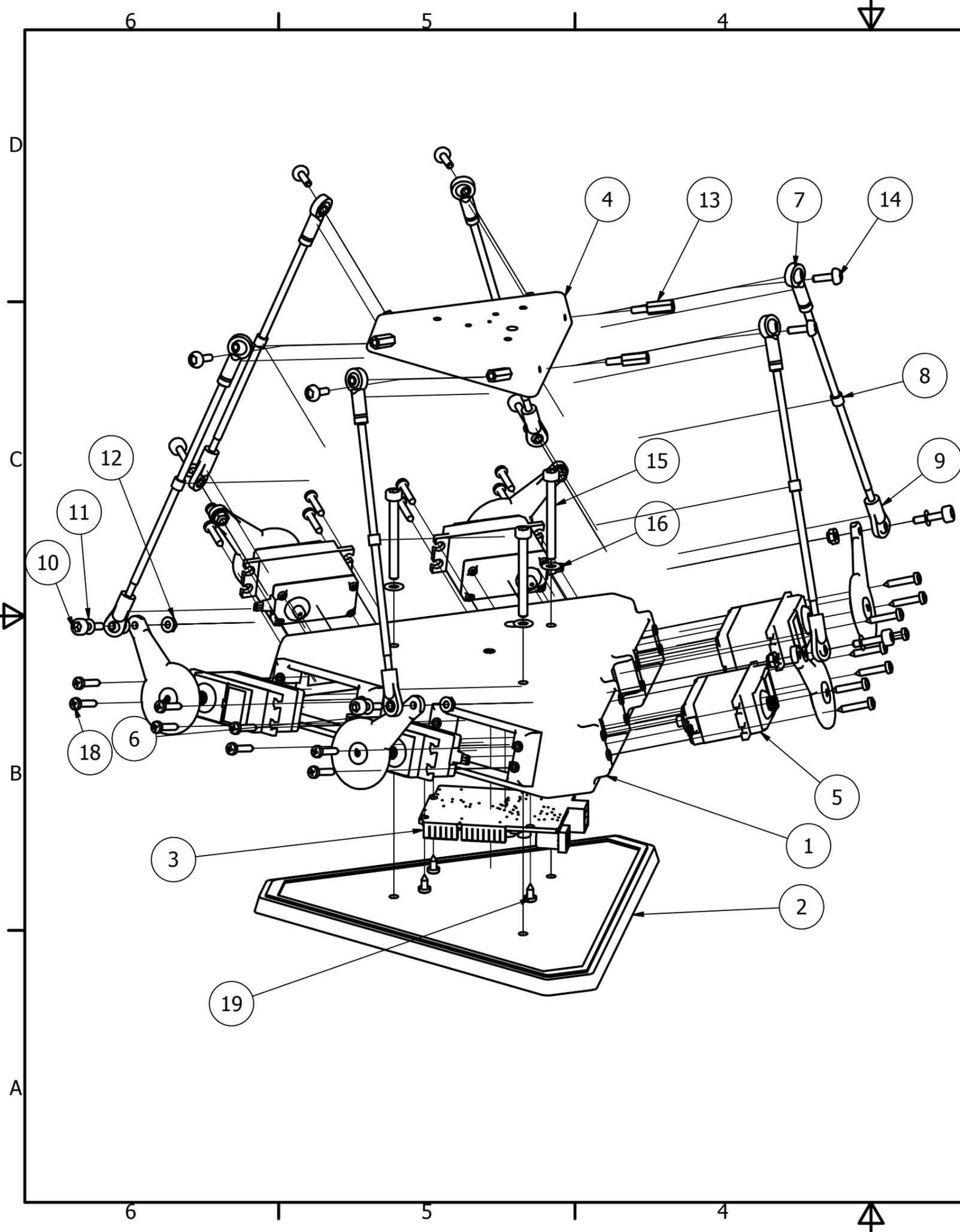
```

```
Serial.print(Angulo_Servo_3);  
Serial.print(' ');  
Serial.print(Angulo_Servo_4);  
Serial.print(' ');  
Serial.print(Angulo_Servo_5);  
Serial.print(' ');  
Serial.print(Angulo_Servo_6);  
Serial.println(' ');  
}
```

# **ANEXO III: PLANOS**

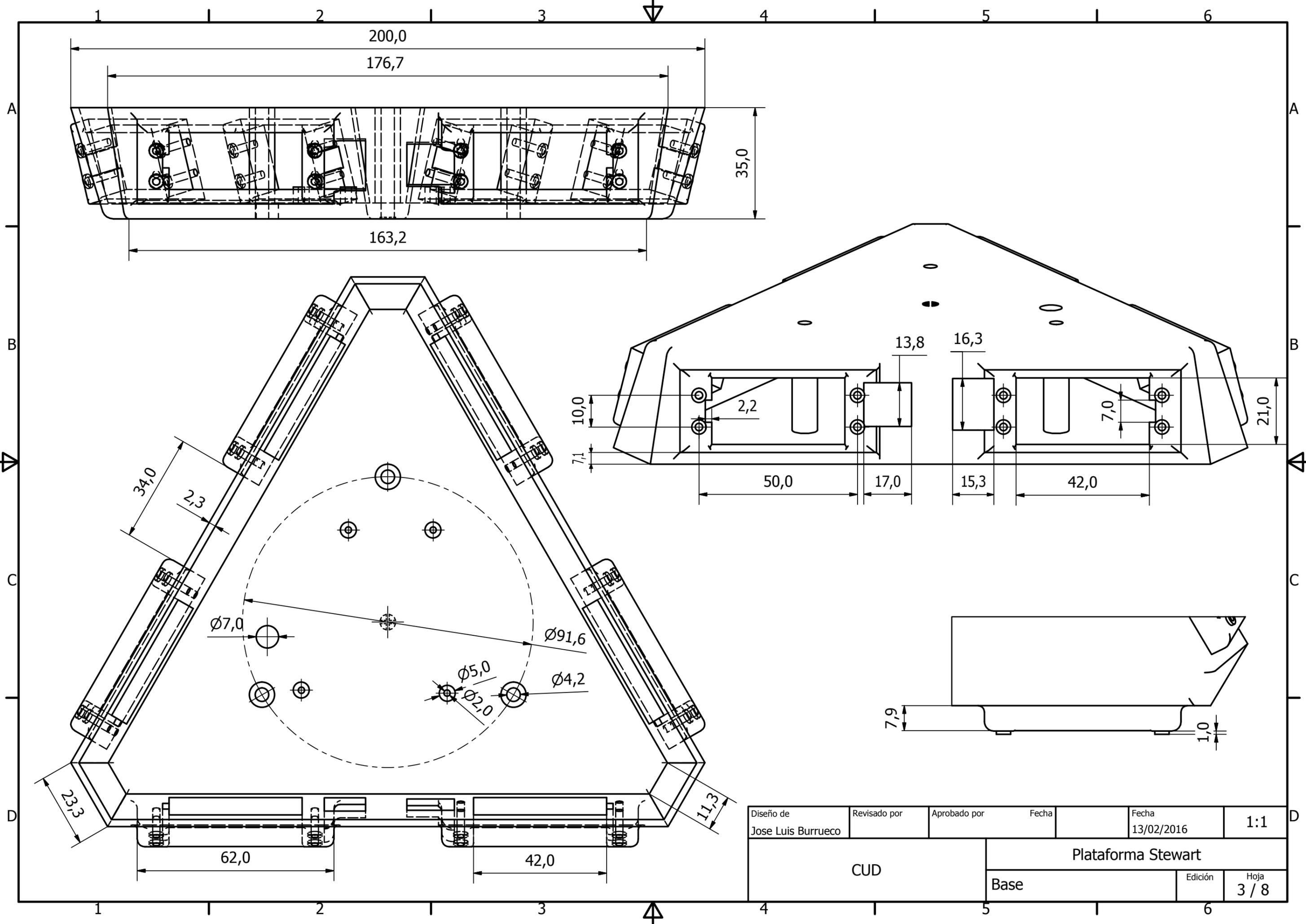


Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:2
CUD			Plataforma Stewart		
			Vista General	Edición	Hoja 1 / 8

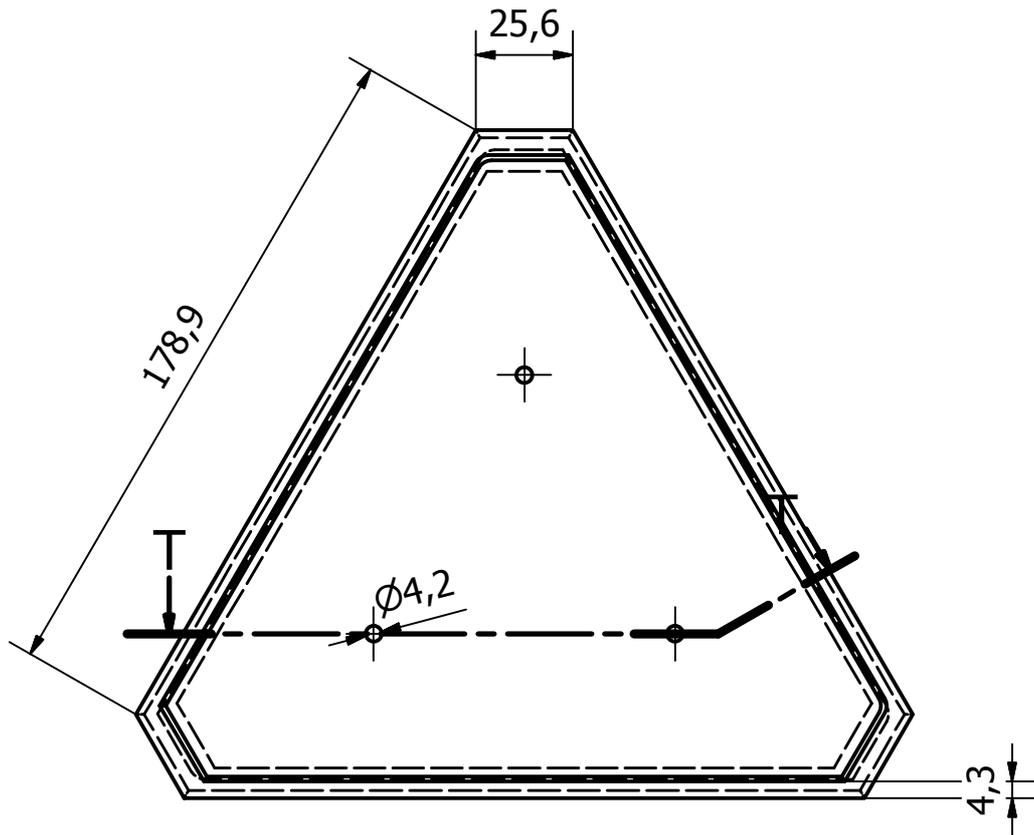


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base	
2	1	Tapa	
3	1	Arduino UNO	
4	1	Efector	
5	6	Servo S901D	
6	6	Brazo del Servo	
7	6	Rotula Metálica	
8	6	Varilla de los brazos	
9	6	Rótula Plástico	
10	6	Tornillo Acero M3x15mm	
11	18	Arandela M3 ext7mm	
12	6	Tuerca de fijacion M3	
13	6	Separador M3	
14	6	Tornillo Acero Inox M3x10mm	
15	3	Tornillo Acero M4x40mm	
16	6	Arandela AG M4 ext7mm	
17	3	Tuerca de fijacion M4	
18	24	Tornillo rosca-chapa 2,9 x 16 mm	
19	3	Tornillo rosca-chapa 2,9 x 6,5 mm	

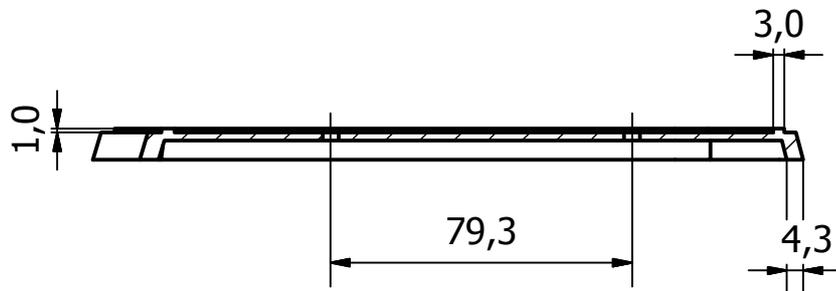
Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:2
CUD			Plataforma Stewart		
			Explosionado	Edición	Hoja 2 / 8



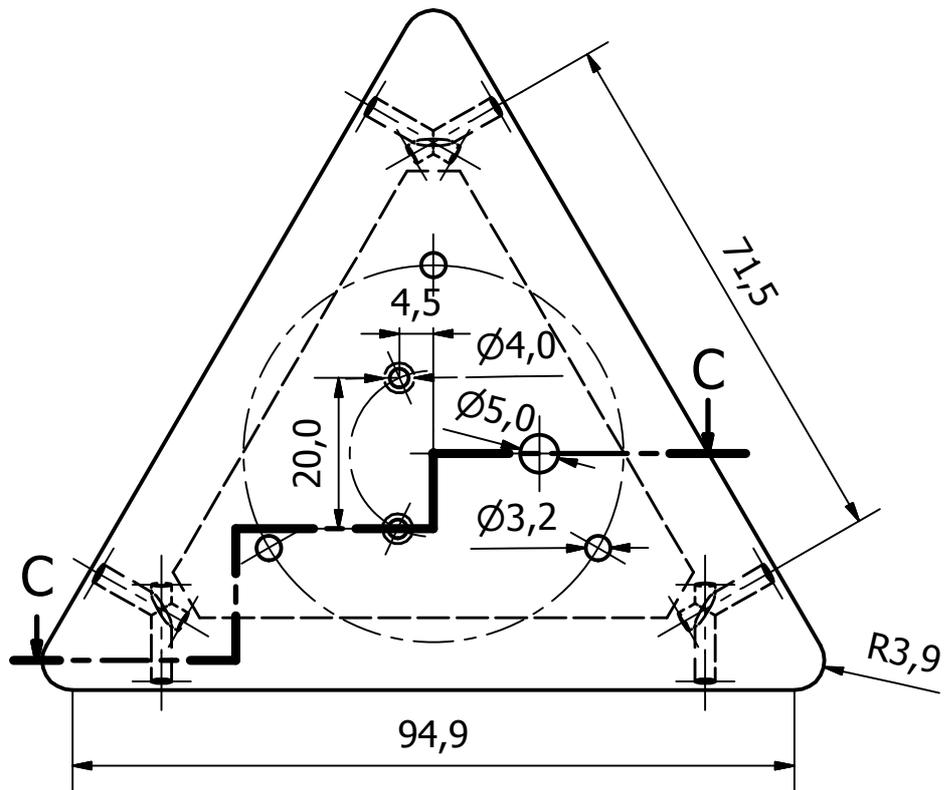
Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:1
CUD			Plataforma Stewart		
			Base	Edición	Hoja 3 / 8



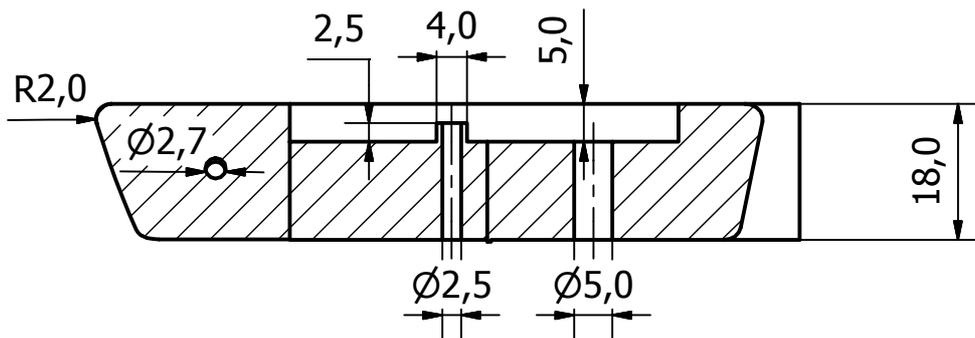
T-T ( 1 : 2 )



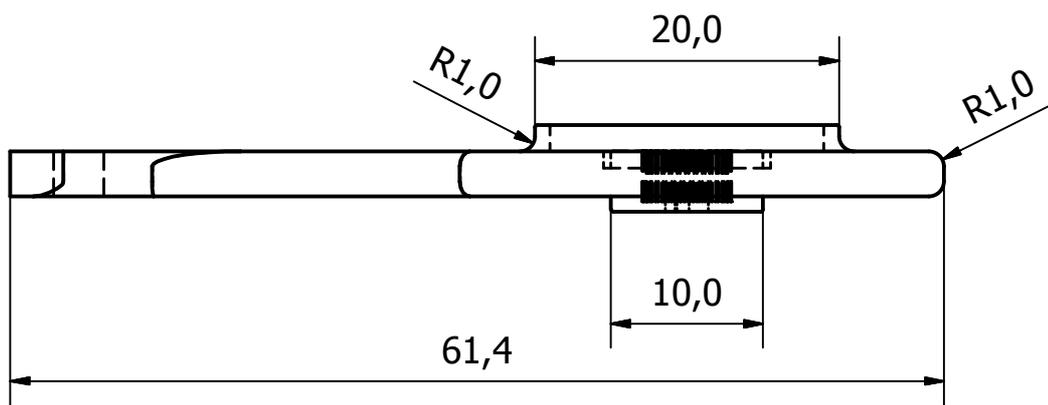
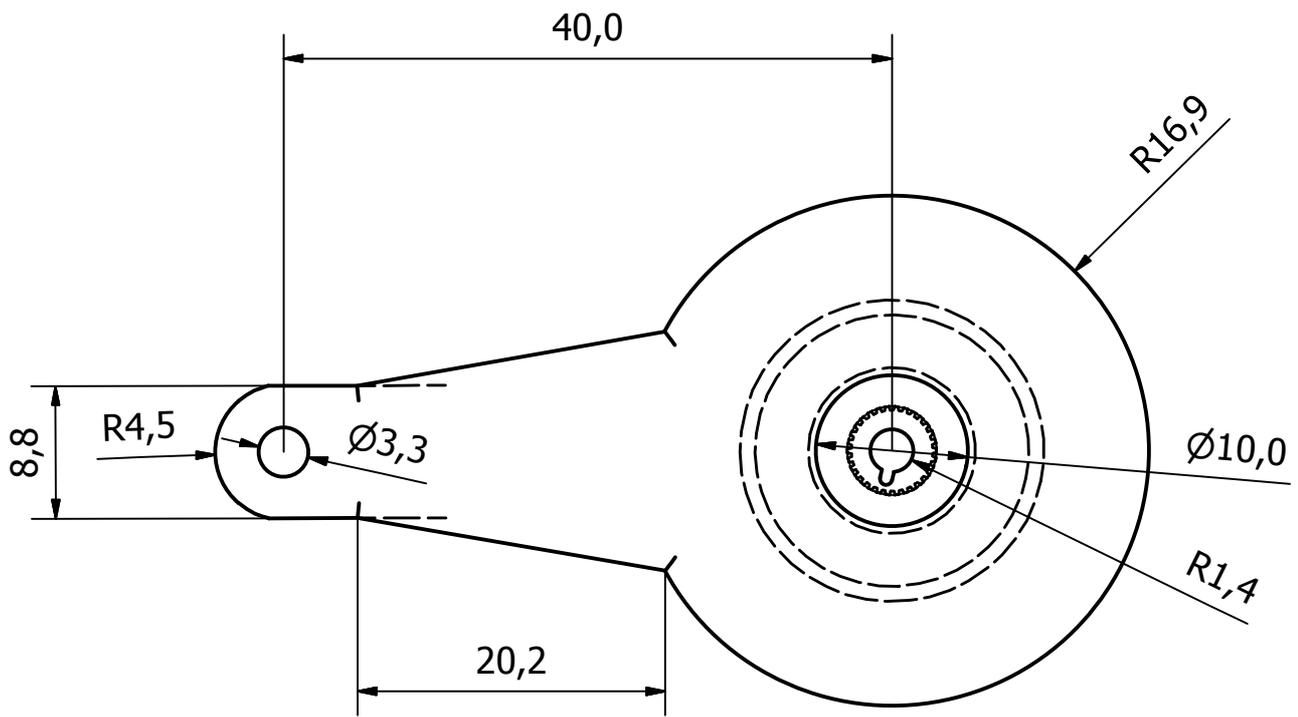
Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:2
CUD			Plataforma Stewart		
			Tapa	Edición	Hoja 4 / 8



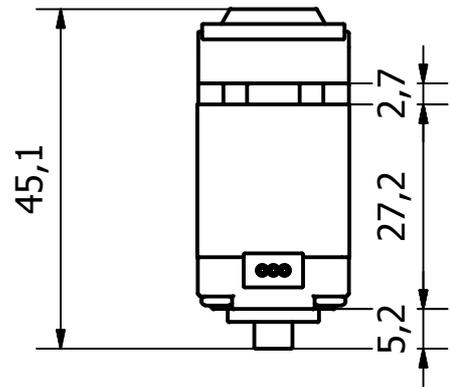
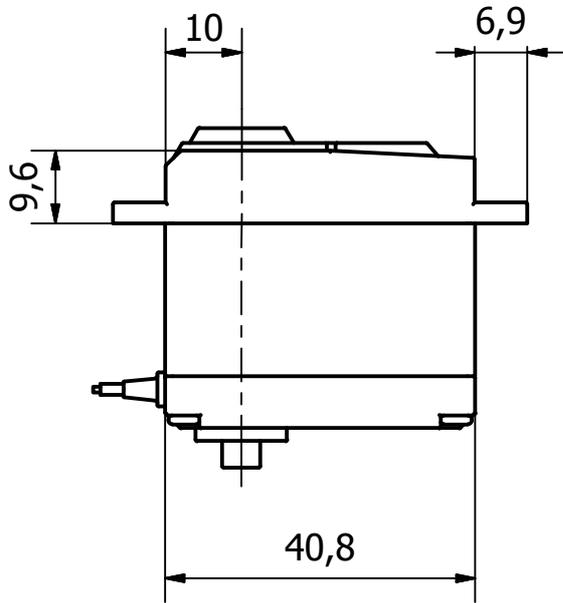
C-C ( 1 : 1 )



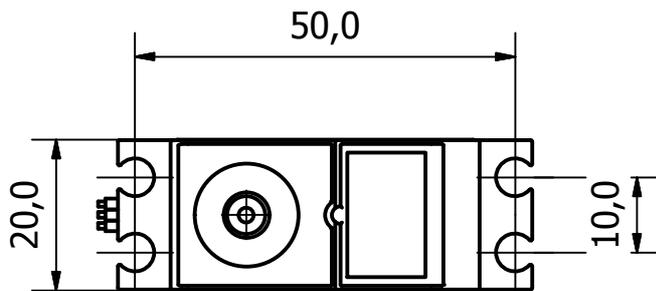
Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:1
CUD			Plataforma Stewart		
			Efactor	Edición	Hoja 5 / 8



Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	2:1
CUD			Plataforma Stewart		
			Brazo del servo	Edición	Hoja 6 / 8

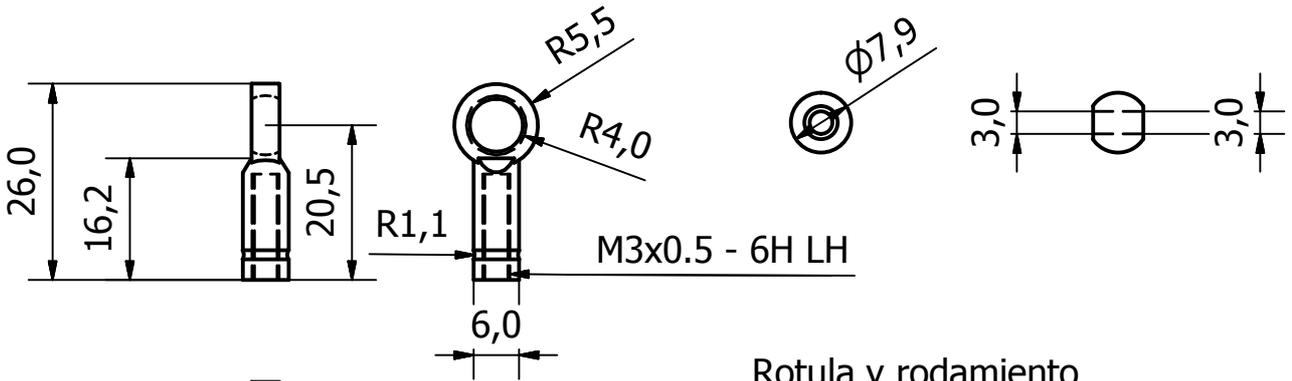
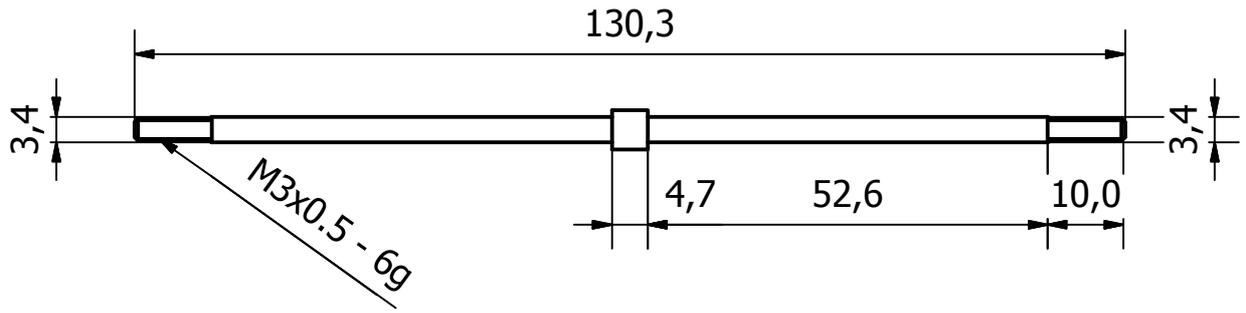


Servo TGY-S901D

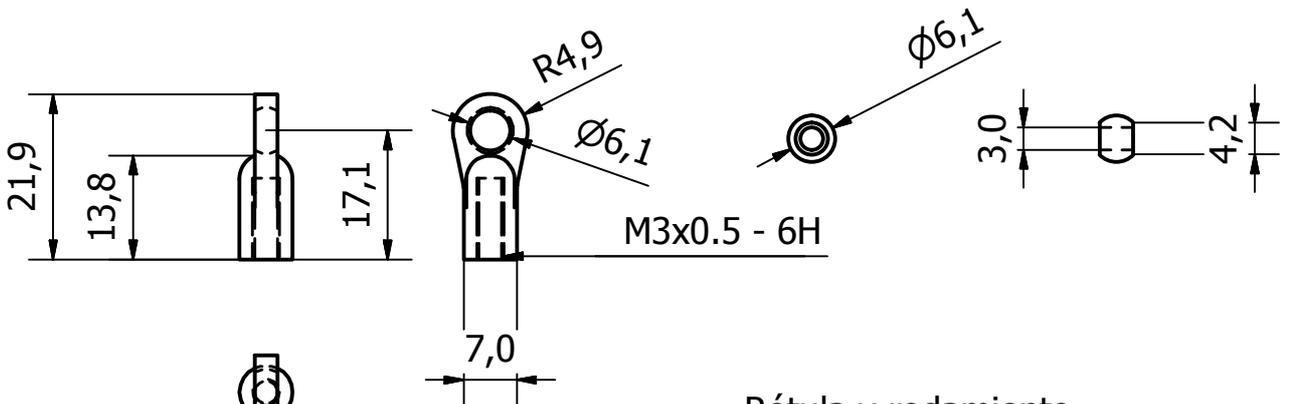


Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:1
CUD			Plataforma Stewart		
			Servo y brazo	Edición	Hoja 7 / 8

Varilla roscada



Rotula y rodamiento superior



Rótula y rodamiento inferior

Diseño de Jose Luis Burrueco	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 13/02/2016	1:1
CUD			Plataforma Stewart		
Varillas y Rótulas				Edición	Hoja 8 / 8

## **ANEXO IV: SIMULACIONES ESTRUCTURALES**

Se presentan a continuación las simulaciones de tensiones y estructura de la plataforma para las diferentes partes del proyecto:

## Informe de análisis de tensión 8.



Archivo analizado:	Plataforma Stewart.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2016 (Build 200138000, 138)
Fecha de creación:	27/02/2016, 18:38
Autor de la simulación:	Jose Luis
Resumen:	

### Información de proyecto (iProperties)

#### Resumen

Autor	Jose Luis
-------	-----------

#### Proyecto

Nº de pieza	Plataforma Stweart
Diseñador	Jose Luis
Coste	0,00 €
Fecha de creación	18/01/2016

#### Estado

Estado del diseño	Trabajo en curso
-------------------	------------------

#### Propiedades físicas

Masa	0,449165 kg
Área	450282 mm <sup>2</sup>
Volumen	637232 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=-24,6003 mm y=408,345 mm z=-148,738 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

### Simulación: 1

#### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de simulación	Análisis estático
Fecha de la última modificación	27/02/2016, 18:00

Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0,3
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0,2
Factor de modificación	1,5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	Sí
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

### Material(es)

Nombre	Plástico PC/ABS	
General	Densidad de masa	0,357273 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	54,4 MPa
	Resistencia máxima a tracción	54,1 MPa
Tensión	Módulo de Young	2,78 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,4 su
	Módulo cortante	0,992857 GPa
Nombre(s) de pieza	Base.ipt Tapa.ipt Peana.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt	
Nombre	Aluminio 6061	
General	Densidad de masa	2,7 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	275 MPa
	Resistencia máxima a tracción	310 MPa
Tensión	Módulo de Young	68,9 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,33 su
	Módulo cortante	25,9023 GPa
Nombre(s) de pieza	Arduino UNO.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Varillas.ipt Varillas.ipt Varillas.ipt	

	Varillas.ipt Varillas.ipt Varillas.ipt	
Nombre	Plástico PLA	
General	Densidad de masa	1,25 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	80 MPa
	Resistencia máxima a tracción	80 MPa
Tensión	Módulo de Young	3,5 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,4 su
	Módulo cortante	1,25 GPa
Nombre(s) de pieza	bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt	

	long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt	
Nombre	Latón, amarillo claro, soldado	
General	Densidad de masa	8,5 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	103,4 MPa
	Resistencia máxima a tracción	275 MPa
Tensión	Módulo de Young	109,6 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,331 su
	Módulo cortante	41,1721 GPa
Nombre(s) de pieza	pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt	
Nombre	Latón, amarillo claro	
General	Densidad de masa	8,47 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	103,4 MPa
	Resistencia máxima a tracción	275 MPa
Tensión	Módulo de Young	109,6 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,331 su
	Módulo cortante	41,1721 GPa
Nombre(s) de pieza	Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1,06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29,6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2,24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,38 su



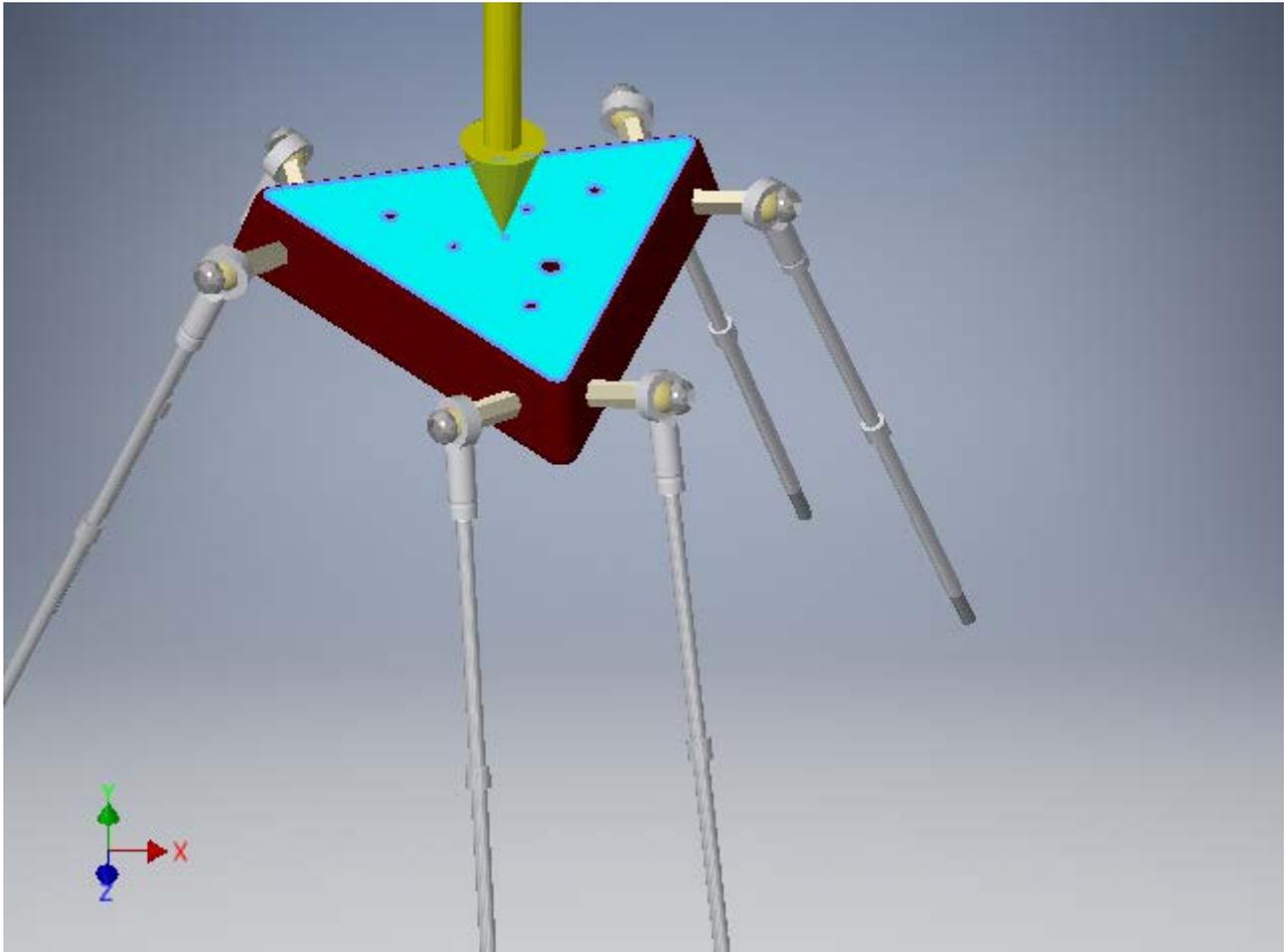
	Arandela AG M3 ext7mm.ipt Arandela AG M3 ext7mm.ipt Arandela AG M3 ext7mm.ipt Arandela AG M3 ext7mm.ipt Tuerca de fijacion M3.ipt Tuerca de fijacion M3.ipt Arandela AG M4 ext7mm.ipt Arandela AG M4 ext7mm.ipt Tuerca de fijacion M4.ipt Tuerca de fijacion M4.ipt Tuerca de fijacion M4.ipt	
Nombre	Acero, suave	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	207 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345 MPa
Tensión	Módulo de Young	220 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,275 su
	Módulo cortante	86,2745 GPa
Nombre(s) de pieza	Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 16 - C - H Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 6,5 - C - H Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 6,5 - C - H Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 6,5 - C - H	

## Condiciones de funcionamiento

### Fuerza:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	197,200 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-197,200 N
Vector Z	-0,000 N

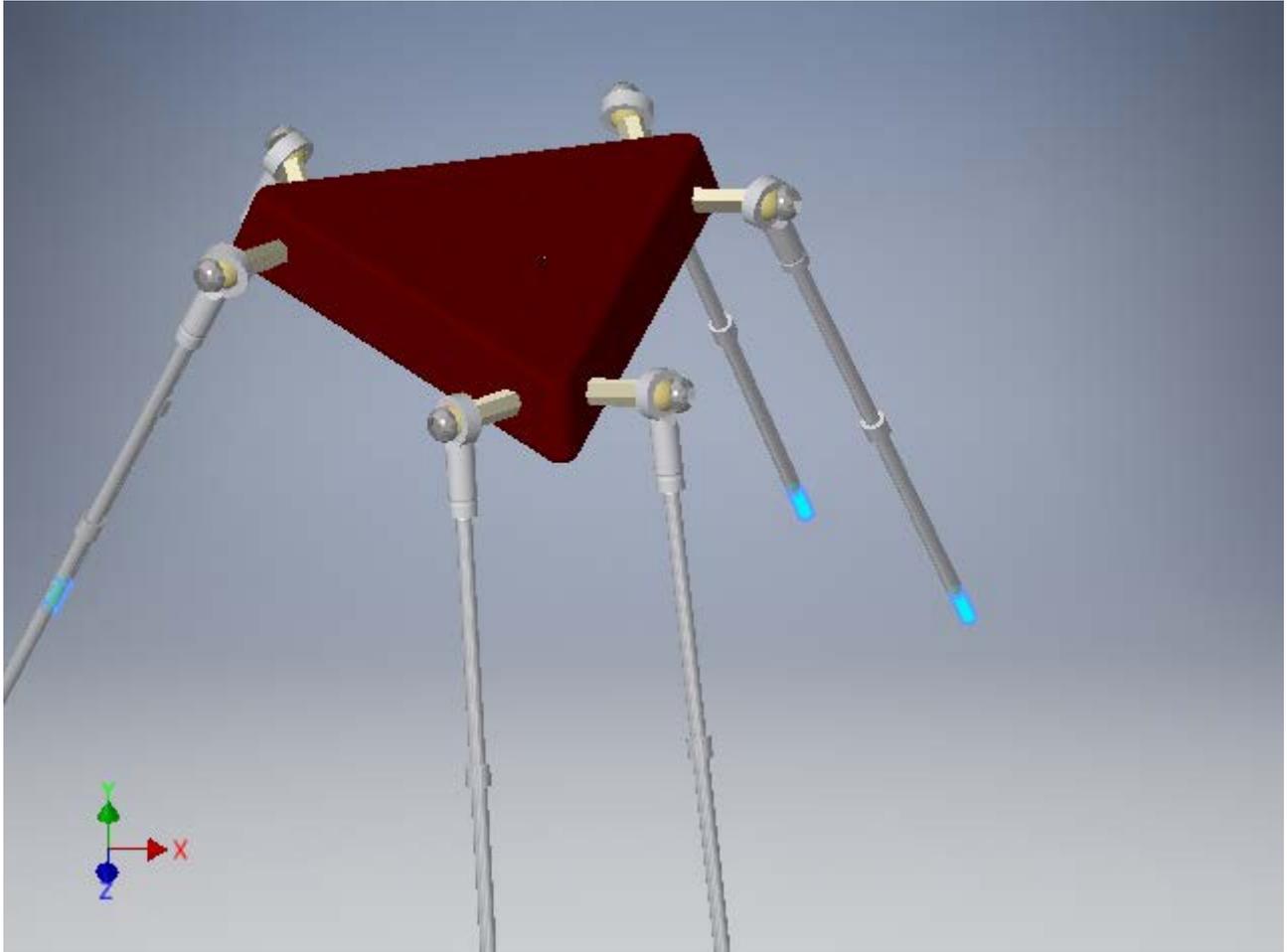
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:2

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

### Cara(s) seleccionada(s)



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

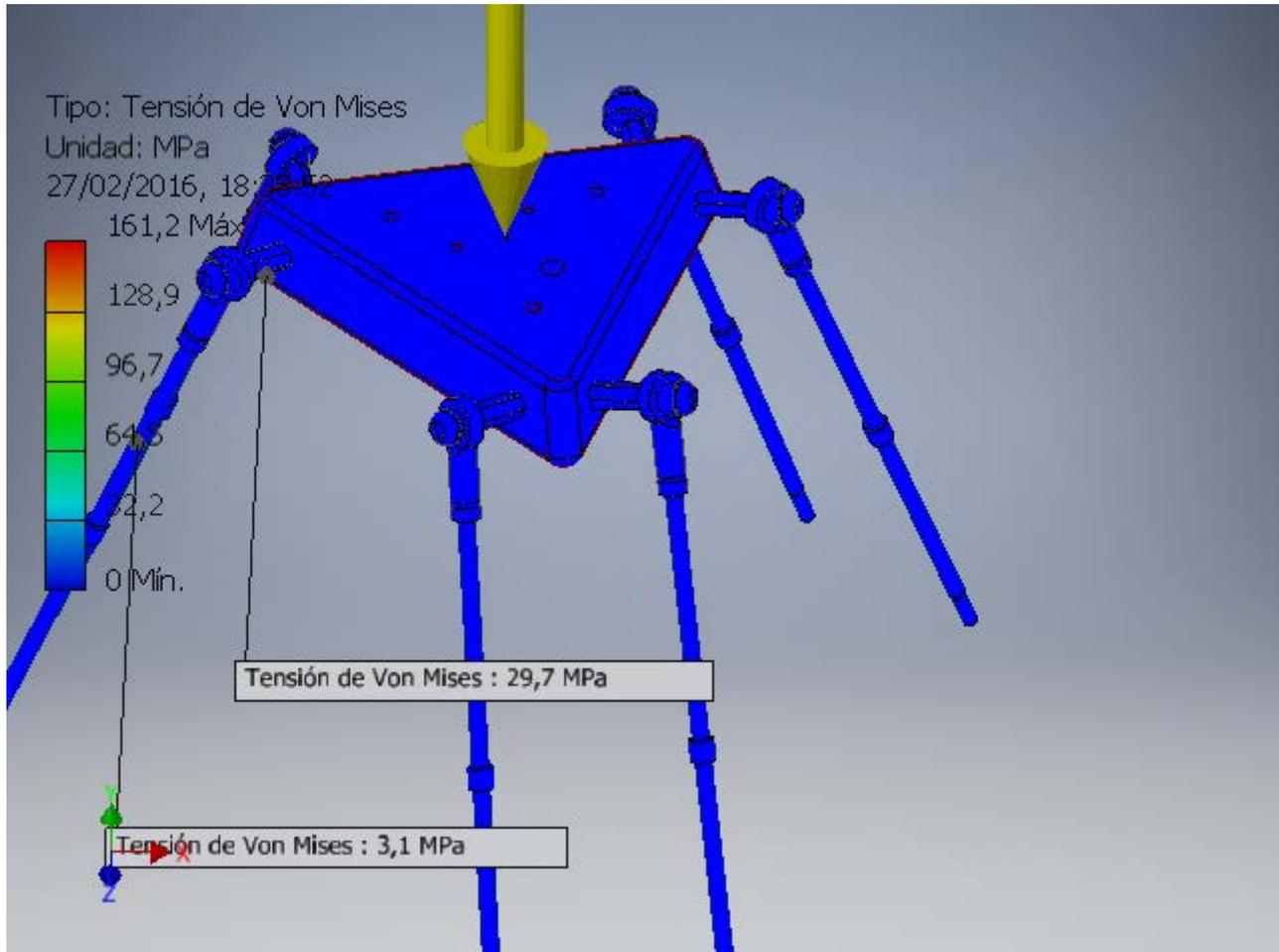
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:2	197,2 N	0 N	0,0804918 N m	-0,0513728 N m
		197,2 N		-0,0619658 N m
		0 N		0 N m

### Resumen de resultados

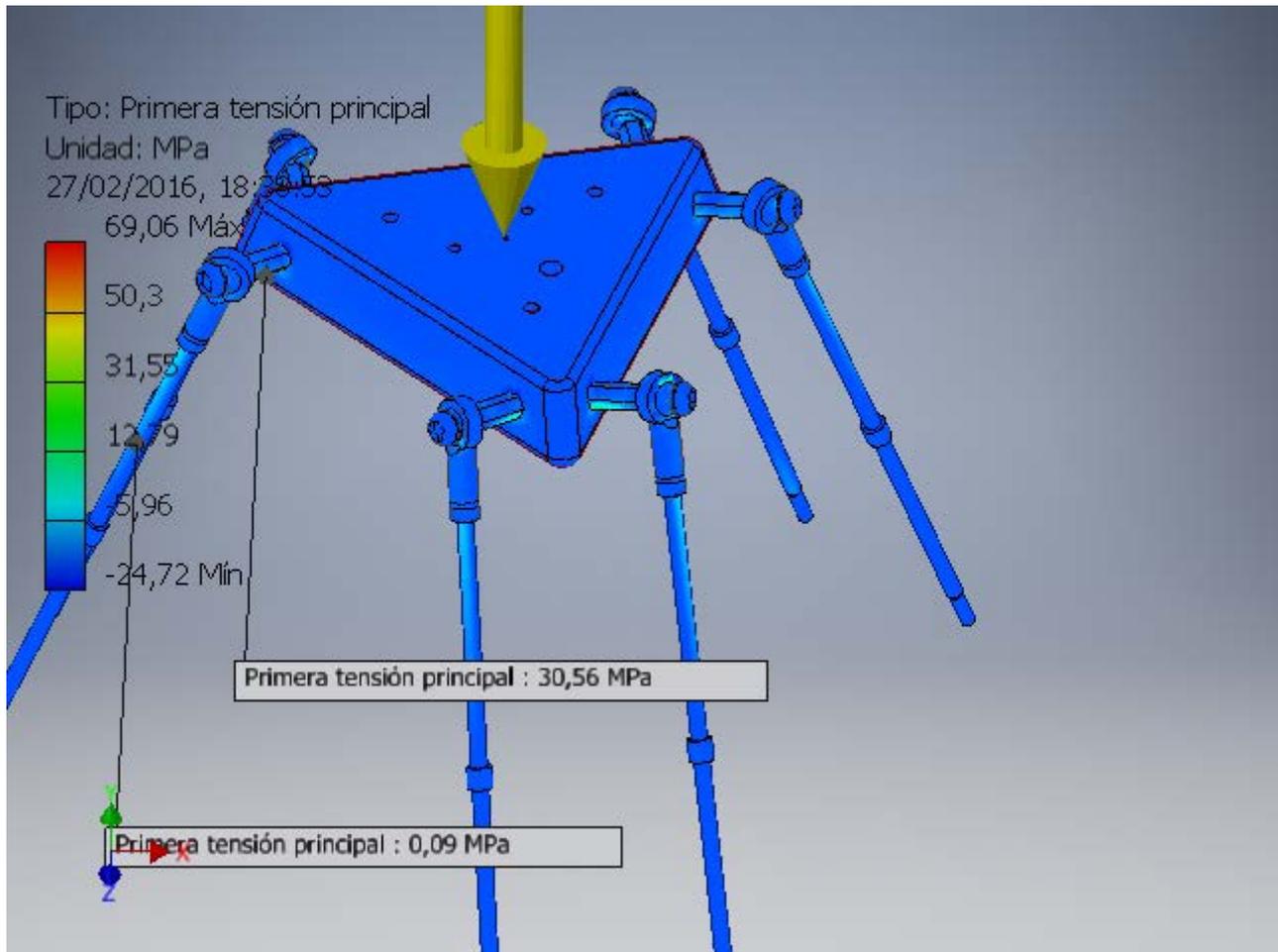
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	85081,6 mm <sup>3</sup>	
Masa	0,0846096 kg	
Tensión de Von Mises	0,000132341 MPa	161,179 MPa
Primera tensión principal	-24,7167 MPa	69,0572 MPa
Tercera tensión principal	-169,378 MPa	23,6697 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,0967799 mm
Coefficiente de seguridad	0,641521 su	15 su

## Figuras

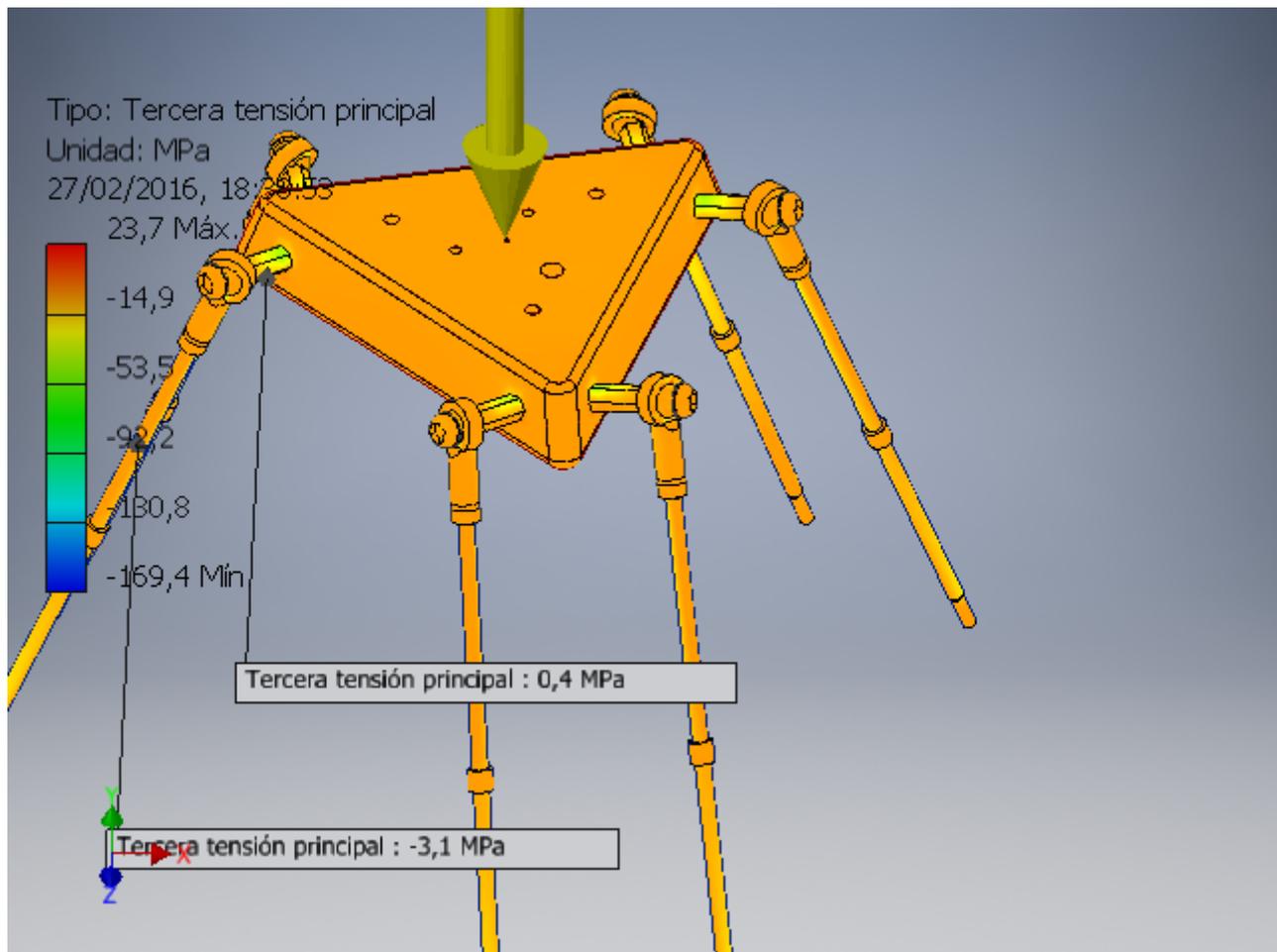
### Tensión de Von Mises



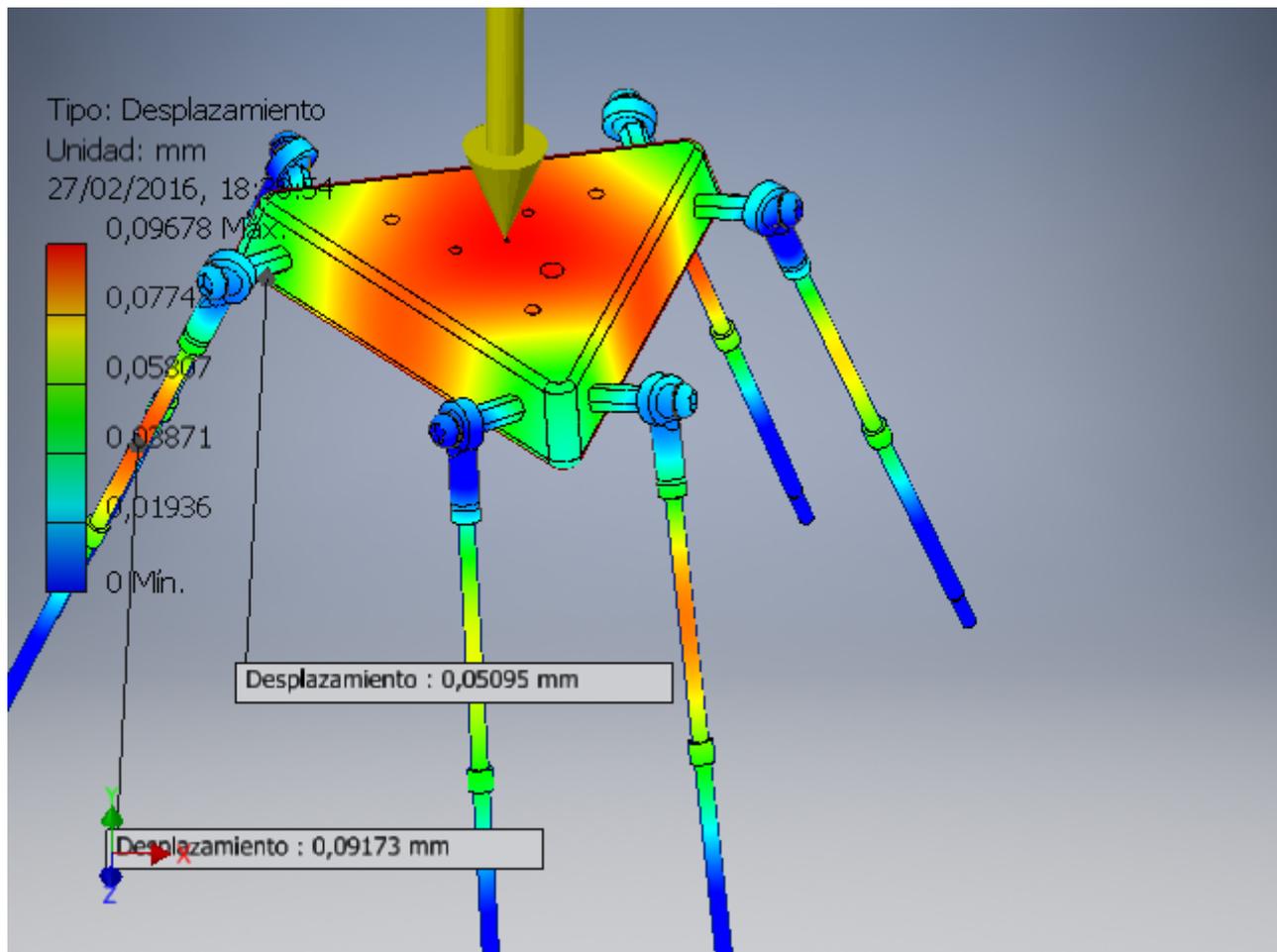
### Primera tensión principal



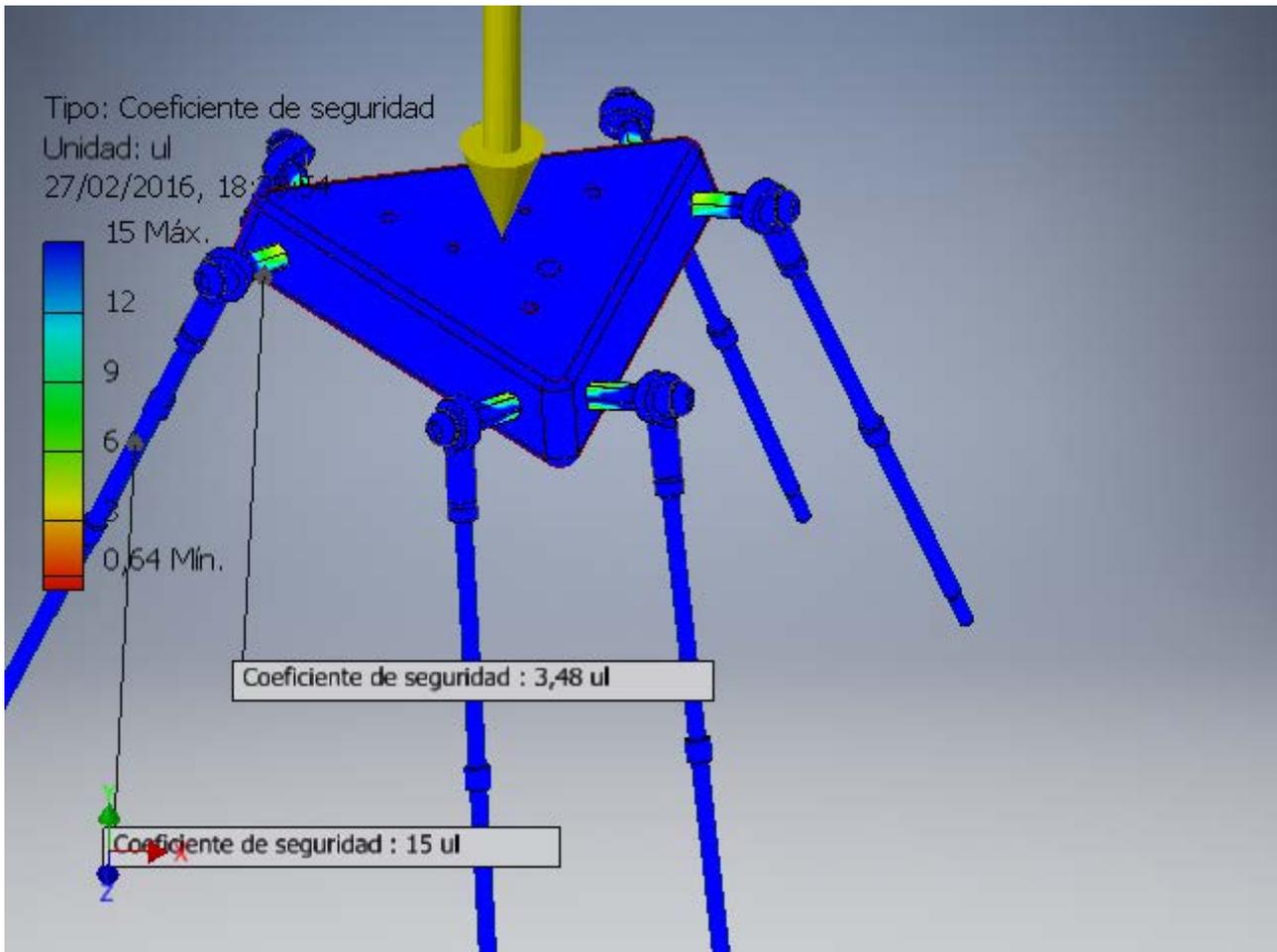
**Tercera tensión principal**



**Desplazamiento**



**Coefficiente de seguridad**



E:\Dropbox\Proyectos\Plataforma Stewart\CAD\Plataforma Stewart.iam

## Informe de análisis de tensión 8.



Archivo analizado:	Plataforma Stewart.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2016 (Build 200138000, 138)
Fecha de creación:	27/02/2016, 21:49
Autor de la simulación:	Jose Luis
Resumen:	

### Información de proyecto (iProperties)

#### Resumen

Autor	Jose Luis
-------	-----------

#### Proyecto

Nº de pieza	Plataforma Stweart
Diseñador	Jose Luis
Coste	0,00 €
Fecha de creación	18/01/2016

#### Estado

Estado del diseño	Trabajo en curso
-------------------	------------------

#### Propiedades físicas

Masa	0,449165 kg
Área	450282 mm <sup>2</sup>
Volumen	637232 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=-24,6004 mm y=408,011 mm z=-148,738 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

### Simulación: 1

#### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de simulación	Análisis estático
Fecha de la última modificación	27/02/2016, 21:02

Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0,3
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0,2
Factor de modificación	1,5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	Sí
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

### Material(es)

Nombre	Plástico PC/ABS	
General	Densidad de masa	0,357273 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	54,4 MPa
	Resistencia máxima a tracción	54,1 MPa
Tensión	Módulo de Young	2,78 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,4 su
	Módulo cortante	0,992857 GPa
Nombre(s) de pieza	Base.ipt Tapa.ipt Peana.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt top-arm.ipt	
Nombre	Aluminio 6061	
General	Densidad de masa	2,7 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	275 MPa
	Resistencia máxima a tracción	310 MPa
Tensión	Módulo de Young	68,9 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,33 su
	Módulo cortante	25,9023 GPa
Nombre(s) de pieza	Arduino UNO.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Parte Metalica.ipt Varillas.ipt Varillas.ipt Varillas.ipt	

	Varillas.ipt Varillas.ipt Varillas.ipt	
Nombre	Plástico PLA	
General	Densidad de masa	1,25 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	80 MPa
	Resistencia máxima a tracción	80 MPa
Tensión	Módulo de Young	3,5 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,4 su
	Módulo cortante	1,25 GPa
Nombre(s) de pieza	bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt bottom-plate.ipt housing.ipt top-plate.ipt long-screw.ipt	

	long-screw.ipt long-screw.ipt long-screw.ipt wire.ipt	
Nombre	Latón, amarillo claro, soldado	
General	Densidad de masa	8,5 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	103,4 MPa
	Resistencia máxima a tracción	275 MPa
Tensión	Módulo de Young	109,6 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,331 su
	Módulo cortante	41,1721 GPa
Nombre(s) de pieza	pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt pinion.ipt	
Nombre	Latón, amarillo claro	
General	Densidad de masa	8,47 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	103,4 MPa
	Resistencia máxima a tracción	275 MPa
Tensión	Módulo de Young	109,6 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,331 su
	Módulo cortante	41,1721 GPa
Nombre(s) de pieza	Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Bola pequeña.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Separador M3.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt Bola.ipt	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1,06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29,6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2,24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,38 su



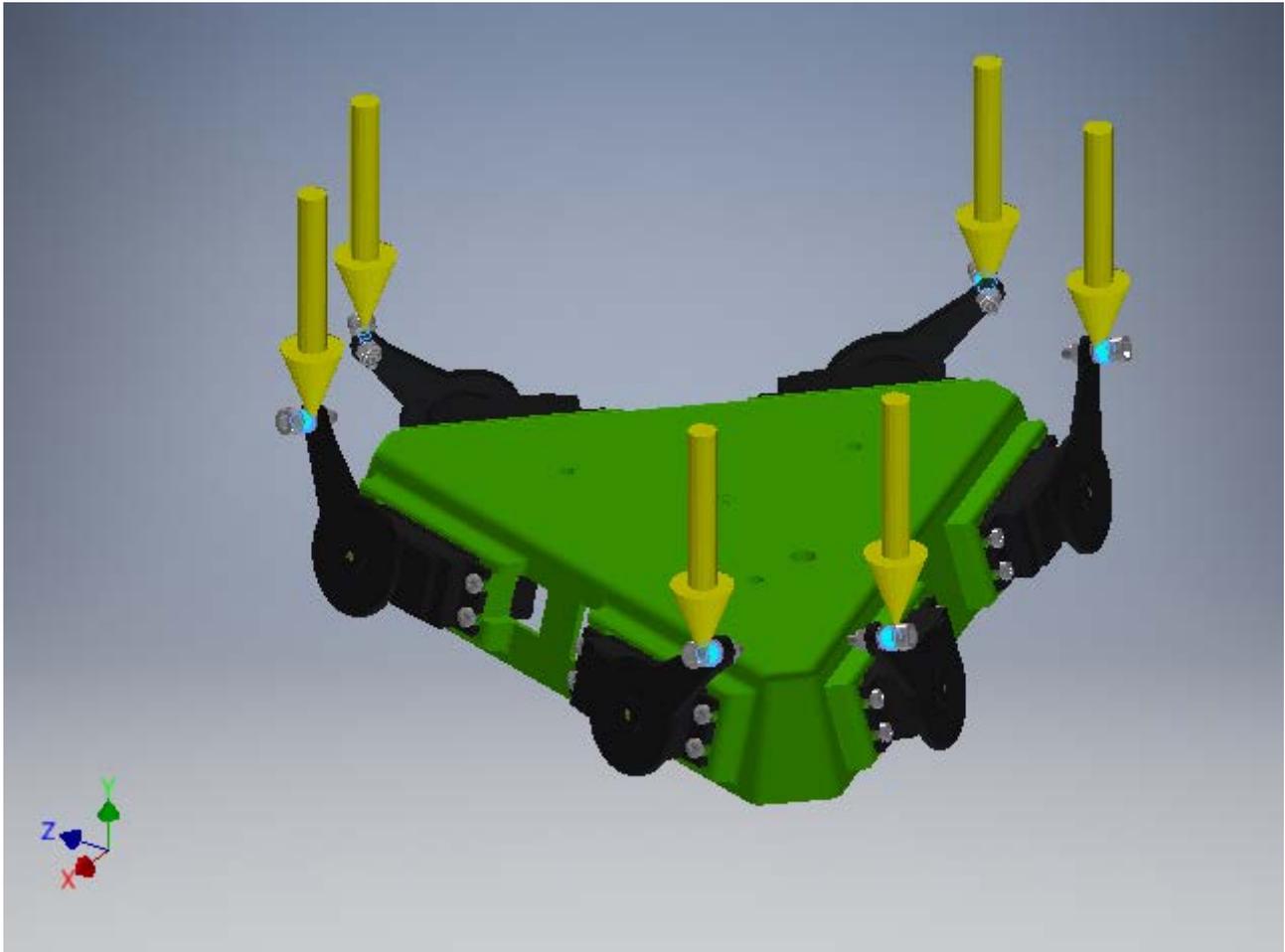
	Arandela AG M3 ext7mm.ipt Arandela AG M3 ext7mm.ipt Arandela AG M3 ext7mm.ipt Arandela AG M3 ext7mm.ipt Tuerca de fijacion M3.ipt Tuerca de fijacion M3.ipt Arandela AG M4 ext7mm.ipt Arandela AG M4 ext7mm.ipt Tuerca de fijacion M4.ipt Tuerca de fijacion M4.ipt Tuerca de fijacion M4.ipt	
Nombre	Acero, suave	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	207 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345 MPa
Tensión	Módulo de Young	220 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,275 su
	Módulo cortante	86,2745 GPa
Nombre(s) de pieza	Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 16 - C - H Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 6,5 - C - H Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 6,5 - C - H Tapping screw GB/T 845-1985 Type C-H ST2,9 x 6,5 - C - H	

## Condiciones de funcionamiento

### Fuerza:2

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	32,600 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-32,600 N
Vector Z	0,000 N

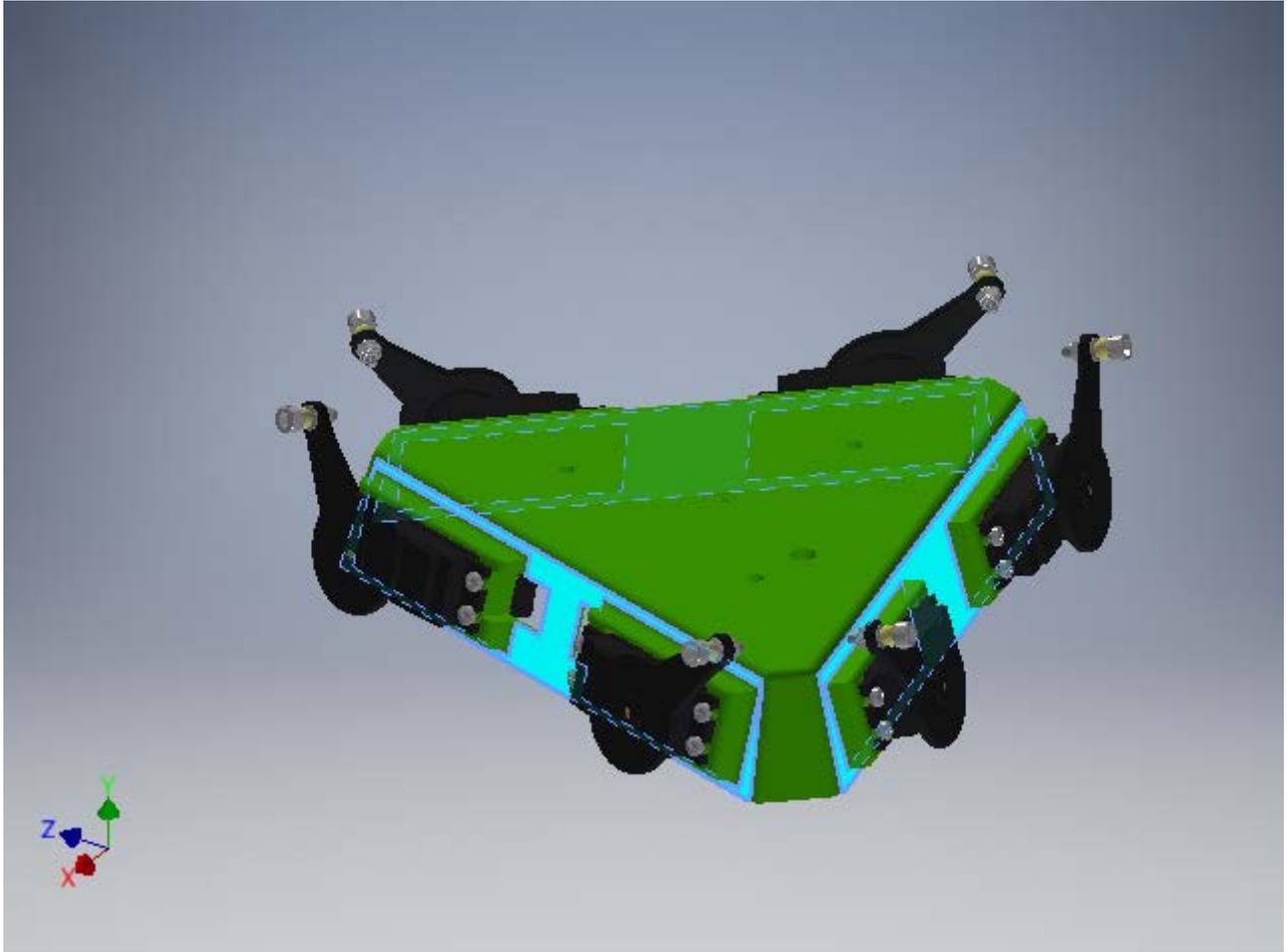
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

### Cara(s) seleccionada(s)



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

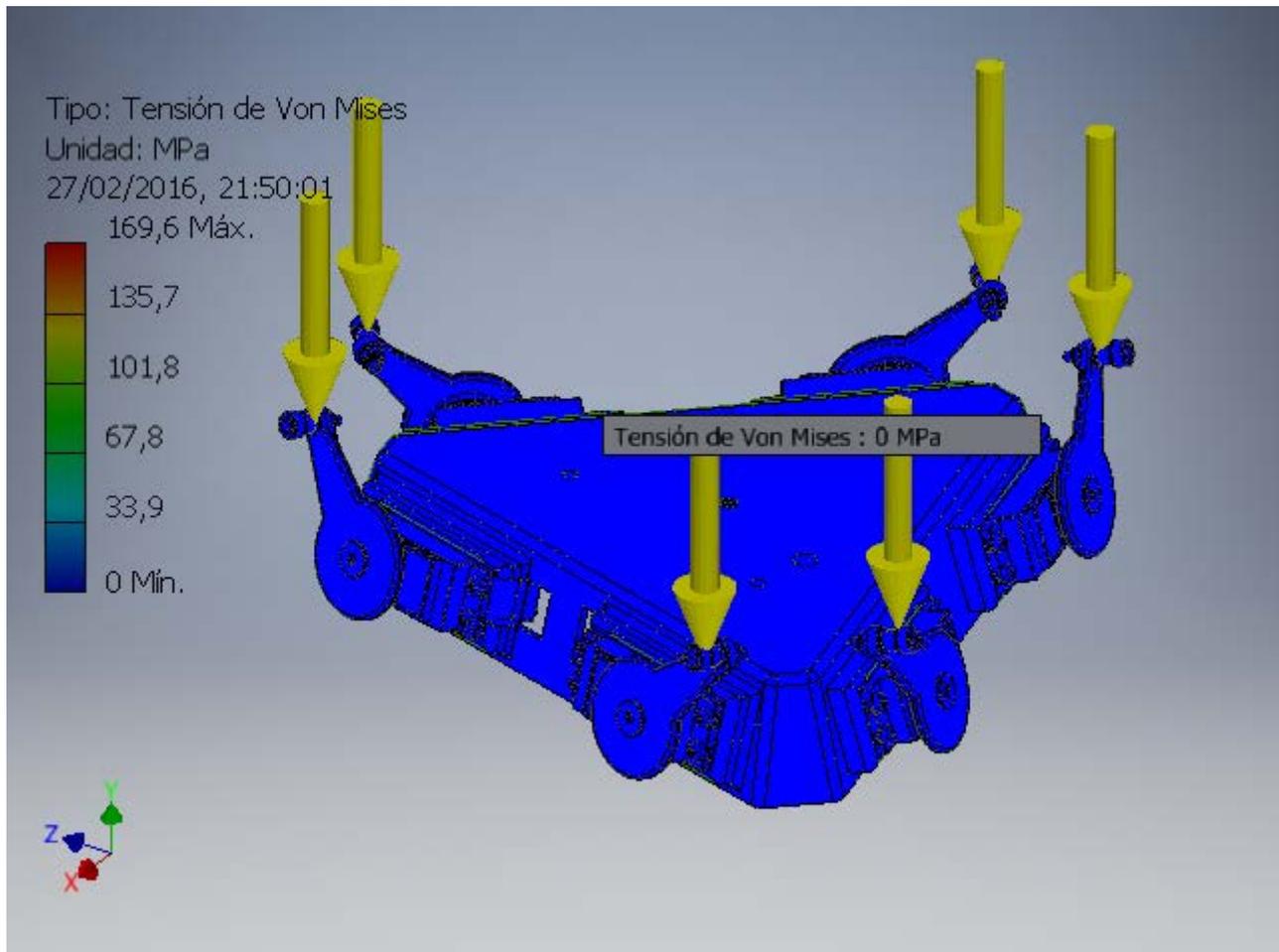
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	32,6 N	0 N	0,396617 N m	0,262717 N m
		32,6 N		-0,00700063 N m
		0 N		0,297044 N m

### Resumen de resultados

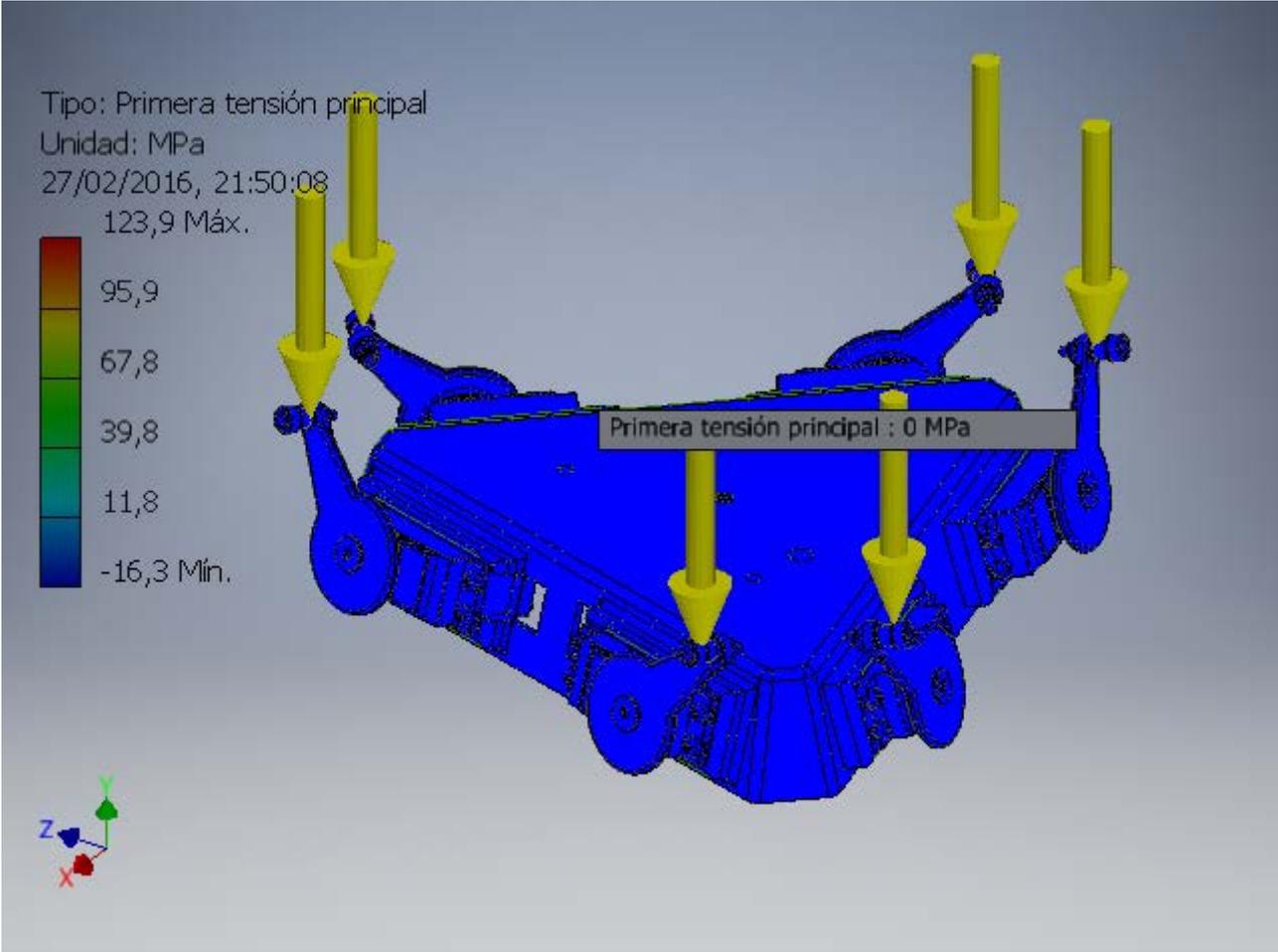
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	242806 mm <sup>3</sup>	
Masa	0,222838 kg	
Tensión de Von Mises	0 MPa	169,623 MPa
Primera tensión principal	-16,272 MPa	123,903 MPa
Tercera tensión principal	-135,998 MPa	16,5882 MPa
Desplazamiento	0 mm	0,112953 mm
Coefficiente de seguridad	1,22035 su	15 su

## Figuras

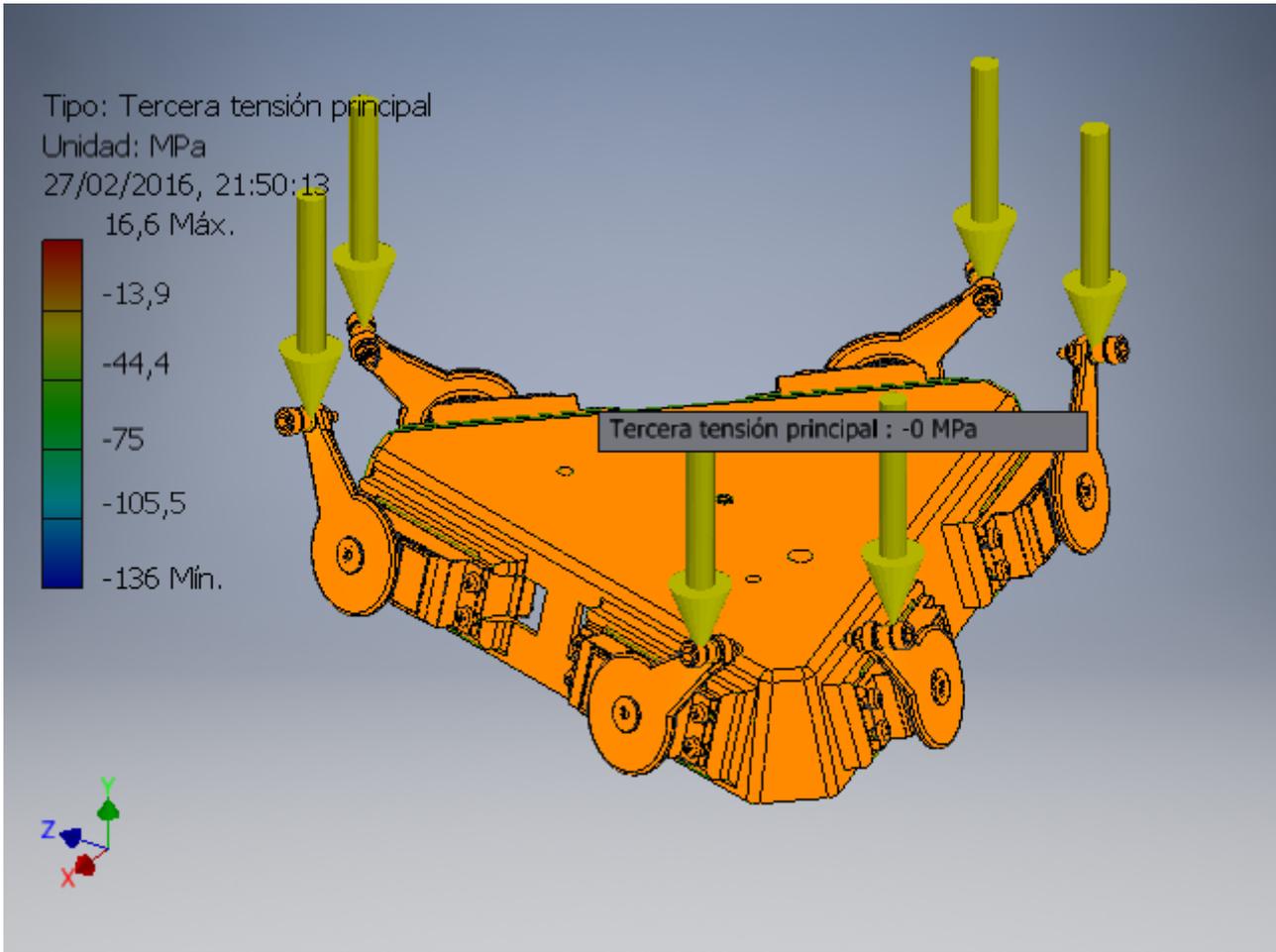
### Tensión de Von Mises



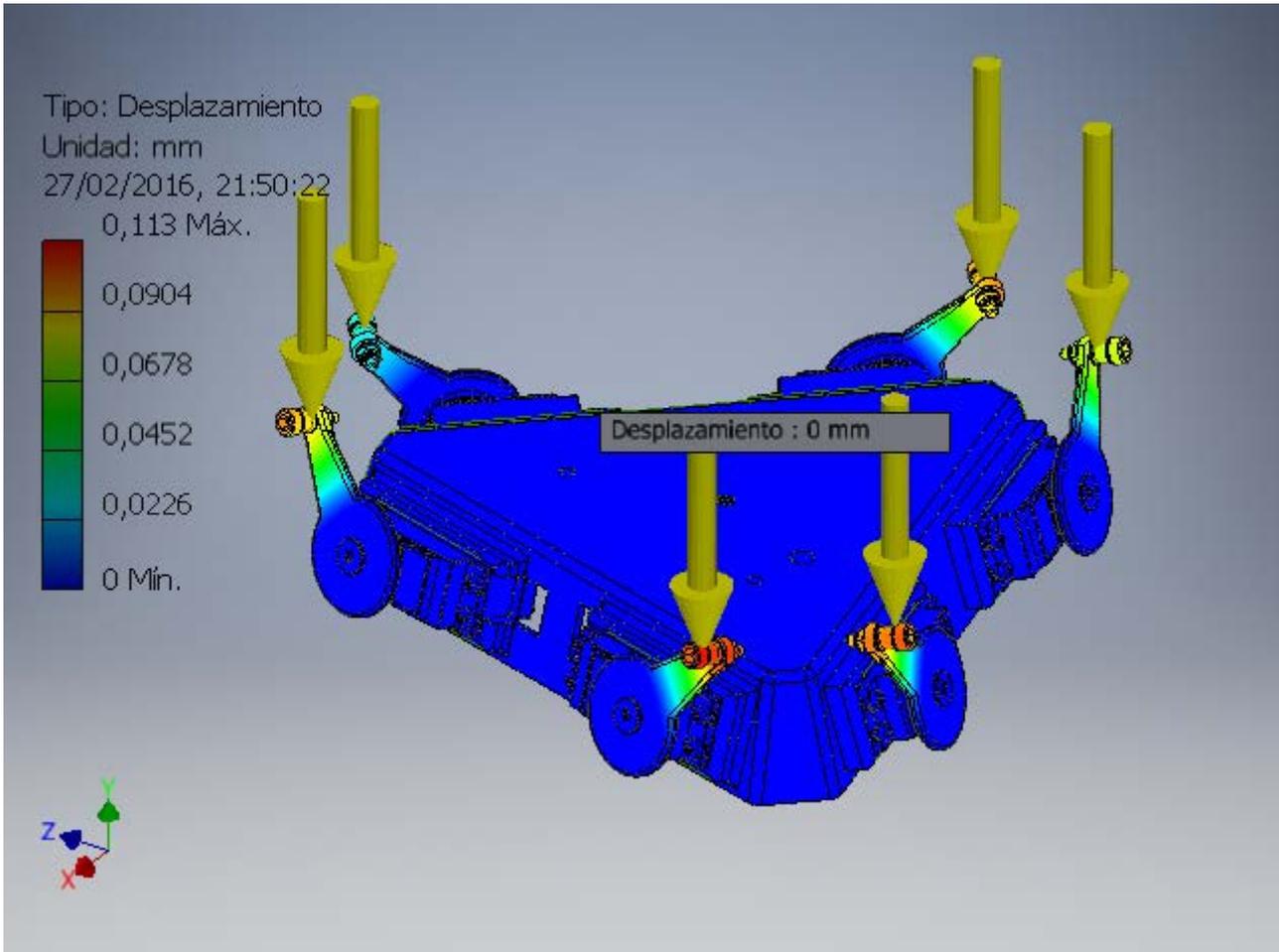
### Primera tensión principal



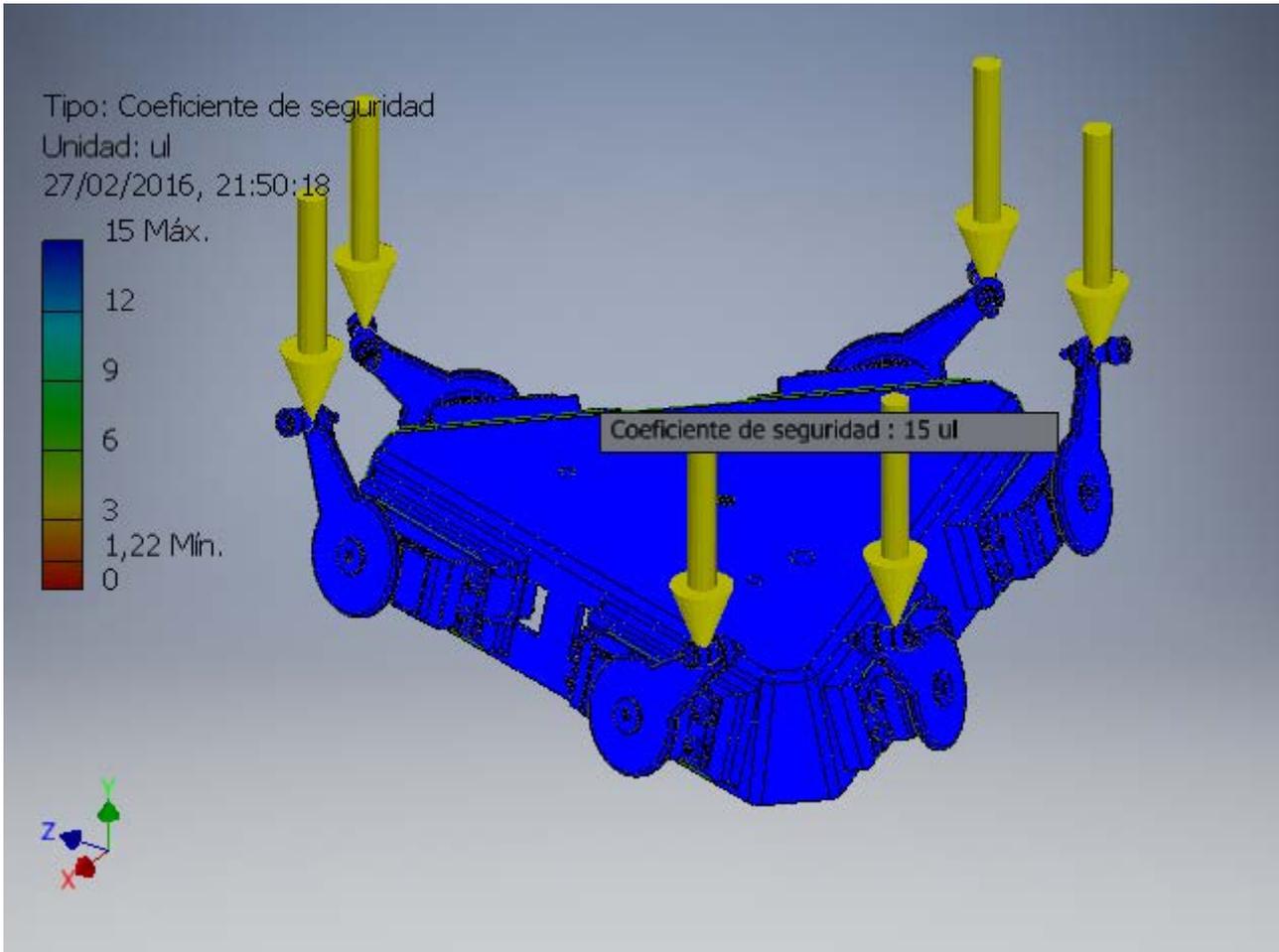
Tercera tensión principal



**Desplazamiento**



**Coefficiente de seguridad**



E:\Dropbox\Proyectos\Plataforma Stewart\CAD\Plataforma Stewart.iam