



VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo Fin de Grado

Grado en ingeniería mecánica

Simulación y análisis de sistemas mecánicos utilizando
herramientas informáticas.

Análisis de una plataforma Stewart-Gough

Autor: Ignacio Plasencia Jara

Tutor: Miguel Ángel Lorenzo Fernández

Septiembre 2017

Índice

Resumen	14
Capítulo I: Introducción	15
1.1. Introducción a la robótica.....	15
1.2. Robot serial y robot paralelo	16
1.2.1. Comparación entre robot serial y robot paralelo.	19
1.3. Plataforma Stewart-Gough	21
1.4. Aplicaciones de la plataforma Stewart-Gough	22
1.4.1. Máquinas de mecanizado	22
1.4.2. Simuladores	23
1.4.3. Posicionamiento de antenas satélite.....	25
1.4.4. Medicina	25
1.5. Objetivos y planteamiento del trabajo	26
1.5.1. Planteamiento.....	28
Capítulo II: Análisis cinemático de la plataforma Stewart-Gough	30
2.1. Descripción general	30
2.2. Dimensiones del robot	31
2.3. Grados de libertad	33
2.4. Análisis de posición	34
2.4.1. Análisis de posición inverso.....	37
2.4.2. Análisis de posición directo.....	37
Capítulo III: Modelado y simulación del robot con Autodesk Inventor.....	38
3.1. Autodesk Inventor.....	38
3.2. CAD: Diseño y modelado del robot.....	39
3.2.1. Diseño y modelado de las piezas	39
3.2.2. Ensamblaje del robot.....	45

3.3.	CAE: Simulación y análisis del robot.....	53
3.3.1.	Cálculos posicionales	53
3.3.2.	Simulación posicional	56
3.3.3.	Espacio de trabajo	65
3.3.4.	Rotación máxima	92
3.3.5.	Análisis tensional	96
Capítulo IV: Diseño de un prototipo		105
4.1.	Descripción general	105
4.2.	Diseño de la maqueta	107
4.3.	Modelado y fabricación de piezas	108
4.3.1.	Base fija de la maqueta	109
4.3.2.	Unión bidireccional rotatoria	109
4.3.3.	Cuerpo del actuador	110
4.3.4.	Tapa del cuerpo del actuador	111
4.3.5.	Mecanismo biela-manivela	111
4.3.6.	Émbolo y vástago	112
4.3.8.	Unión esférica.....	113
4.3.9.	Plataforma superior de la maqueta	114
4.3.10.	Montaje	114
4.4.	Control de posición del prototipo.....	115
Capítulo V: Conclusiones.....		118
5.1.	Conclusiones técnicas	118
5.2.	Conclusiones personales.....	120
Bibliografía.....		121
Anexos		124
Anexo I: Documentación de los productos comerciales		125
Anexo II: Planos de montaje		129
Anexo III: Planos de las piezas diseñadas		132
Anexo IV: Programación en Mathemática.....		135

Anexo V: Programación en C++ para arduino..... 138

Índice de figuras

Figura 1.1. Joseph F. Engelberger con su creación, el brazo robótico "Unimate"[23]..	15
Figura 1.2. Robot serial ABB (a) y Robot paralelo Adept (b). [3] y [2].....	16
Figura 1.3. Robot paralelo Biglide [4]	17
Figura 1.4. Robot Orthoglide [5].....	17
Figura 1.5. Robot Quadrupton [5]	18
Figura 1.6. Plataforma Stewart-Gough [6].....	18
Figura 1.7. Robot de pruebas de neumáticos Dunlop (1962) [1]	21
Figura 1.8. Robot Space 5-H de mecanizado de piezas [15].....	22
Figura 1.9. Simulador de vuelo Eclipse 500 [16]	23
Figura 1.10. Simulador automovilístico desarrollado por HPD [17].....	24
Figura 1.11. Simulador Aquilon [26].....	24
Figura 1.12. Robot hexápodo Brevia [26].....	25
Figura 1.13. Sistema de fijación Smart Correction para operaciones de fracturas de huesos [27].....	25
Figura 2.1. Esquema de la base fija (a) y de la base móvil (b).	31
Figura 2.2. Esquema estructural de la plataforma Stewart-Gough	32
Figura 2.3. Plataforma Stewart Con uniones tipo S-P-S [11].....	33
Figura 2. 4. Representación vectorial de la plataforma Stewart-Gough [12].....	35
Figura 3.1. Pasos a seguir para crear una pieza en Autodesk Inventor	39
Figura 3.2. Herramientas de modelado de piezas de Autodesk Inventor.....	39
Figura 3.3. Diseño previo de la plataforma Stewart-Gough [22]	40
Figura 3.4. Vistas isométricas (a) y (b) del actuador Festo.....	41

Figura 3.5. Vista isométrica del cabezal A	42
Figura 3.6. Vistas isométricas (a) y (b) del cabezal B.....	42
Figura 3.7. Vista isométrica de la unión universal	43
Figura 3. 8.Vista isométrica del eje del soporte.....	43
Figura 3.9. Vista isométrica de las piezas (a),(b),(c) y (d) de la base fija.....	44
Figura 3.10. Vista isométrica de la base móvil	45
Figura 3.11. Pasos a seguir para crear un ensamblaje con Autodesk Inventor	46
Figura 3.12. Ensamblaje de la base fija	46
Figura 3.13. Preparación de piezas para soldadura.....	47
Figura 3.14. Cordones de soldadura de la base fija	48
Figura 3.15. Base fija.....	48
Figura 3.16. Ensamblaje del cabezal A sin fijaciones.....	49
Figura 3.17. Ensamblaje del cabezal A completo.....	49
Figura 3.18. Ensamblaje del cabezal B completo.....	50
Figura 3.19. Ensamblaje de la unión universal.....	50
Figura 3.20. Ensamblaje de la junta inferior a la base fija	51
Figura 3.21. Ensamblaje entre el actuador y la junta de la base	51
Figura 3.22. Ensamblaje de la pierna con la base fija	52
Figura 3.23. Ensamblaje completo de la plataforma Stewart-Gough.....	52
Figura 3.24. Dimensiones analíticas de las bases del robot.....	53
Figura 3.25. Estructura alámbrica real del robot.....	54
Figura 3.26. Longitud mínima de la pierna del robot	54
Figura 3.27. Longitud máxima de la pierna del robot.....	55
Figura 3.28. Plataforma Stewart-Gough en posición de altura media.....	57
Figura 3.29. Desplazamiento en el eje X de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano XZ)	58
Figura 3.30. Desplazamiento en el eje Y de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ)	59

Figura 3.31. Desplazamiento en el eje Z de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ y XZ).....	60
Figura 3.32. Giro en el eje X de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ)	61
Figura 3.33. Giro en el eje Y de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ)	62
Figura 3.34. Giro en el eje Z de la plataforma Stewart-Gough (Vista isométrica)	63
Figura 3.35. Posición máxima teórica del robot en el eje X, plano de vista XZ.....	65
Figura 3.36. Posición máxima teórica del robot en el eje X, plano de vista isométrica	65
Figura 3.37. Posición límite negativa de la plataforma en el plano YZ	67
Figura 3.38. Punto de contacto de los actuadores en la posición límite negativa en el plano YZ	67
Figura 3.39. Posición límite positiva de la plataforma en el plano YZ.....	68
Figura 3.40. Punto de contacto de los actuadores en la posición límite positiva en el plano YZ	68
Figura 3.41. Punto de contacto en la posición límite negativa de la plataforma en el plano XZ	69
Figura 3.42. Zona de contacto en la posición negativa de los puntos adicionales.....	71
Figura 3.43. Altura máxima y mínima de la plataforma móvil en el eje Z.....	72
Figura 3.44. Trayectorias de desplazamiento del robot en el plano XZ (a) y en el plano YZ (b)	89
Figura 3.45. Trayectorias de desplazamiento del robot en el plano de puntos adicionales (a) y en el plano XY (b)	89
Figura 3.46. Trayectoria de desplazamiento completo a través de todos los puntos máximos alcanzables por el robot en el espacio	90
Figura 3.47. Vistas isométricas del espacio de trabajo.....	90
Figura 3.48. Vistas frontal (a) y posterior (b) del espacio de trabajo.....	91
Figura 3.49. Vistas derecha (a) e izquierda (b) del espacio de trabajo.....	91
Figura 3.50. Vistas superior (a) e inferior (b) del espacio de trabajo	91
Figura 3.51. Plataforma Stewart-Gough con representación del espacio de trabajo ...	92
Figura 3.52. Ángulo de giro máximo respecto al eje X (Ψ).....	93
Figura 3.53. Ángulo de giro máximo respecto al eje Y (θ).....	94

Figura 3. 54. Ángulo de giro máximo respecto al eje Z (α)	95
Figura 3.55. Restricción (a) y carga (b) de la simulación tensional del cabezal A	97
Figura 3.56. Tensión de Von Mises en el cabezal A	98
Figura 3.57. Desplazamiento sufrido por el cabezal A	98
Figura 3.58. Coeficiente de seguridad del cabezal A	99
Figura 3.59. Restricción (a) y carga (b) de la simulación tensional de la base fija.....	100
Figura 3.60. Tensión de Von Mises en la base fija.....	101
Figura 3.61. Desplazamiento sufrido por la base fija.....	101
Figura 3. 62. Coeficiente de seguridad de la base fija.....	102
Figura 3. 63. Restricción (a) y carga (b) de la simulación tensional de la base móvil	102
Figura 3.64. Tensión de Von Mises en la base móvil	103
Figura 3.65. Desplazamiento sufrido por la base móvil	103
Figura 3. 66. Coeficiente de seguridad de la base móvil	104
Figura 4.1. Impresora Anet A6	105
Figura 4. 2. Rollo de plástico PLA blanco para impresión 3D.....	106
Figura 4.3. Impresión 3D de la base de la maqueta	108
Figura 4.4. Base fija de la maqueta digital y real.....	109
Figura 4.5. Unión bidireccional rotatoria digital y real.....	109
Figura 4.6. Cuerpo del actuador digital y real.....	110
Figura 4.7.Tapa del cuerpo del actuador digital y real.....	111
Figura 4.8. Biela digital y real.....	111
Figura 4.9. Émbolo digital y real.....	112
Figura 4.10.Vástago digital y real.....	112
Figura 4.11. Partes de la unión esférica digitales.....	113
Figura 4.12. Unión esférica real	113
Figura 4.13. Base móvil digital y real	114
Figura 4.14. Maqueta digital y real	114

Figura 4.15. Diagrama de conexiones del prototipo 116

Índice de tablas

Tabla 1.1. Comparación estructural y de control entre robots tipo serie y paralelo.....	20
Tabla 2.1. Coordenadas de los vértices de la base fija (a) y de la base móvil (b)	32
Tabla 3.1. Posición media de la plataforma móvil	56
Tabla 3. 2. Longitud de actuadores en la posición media de la plataforma móvil	56
Tabla 3.3. Desplazamiento en el eje X de la plataforma móvil	58
Tabla 3.4. Longitud de actuadores al desplazar la plataforma móvil en el eje X.....	58
Tabla 3.5. Desplazamiento en el eje Y de la plataforma móvil	59
Tabla 3.6. Longitud de actuadores al desplazar la plataforma móvil en el eje Y.....	59
Tabla 3.7. Desplazamiento en el eje Z de la plataforma móvil	60
Tabla 3.8. Longitud de actuadores al desplazar la plataforma móvil en el eje Z.....	60
Tabla 3.9. Giro en el eje X de la plataforma móvil.....	61
Tabla 3.10. Longitud de actuadores al girar la plataforma móvil en el eje X.....	61
Tabla 3.11. Giro en el eje Y de la plataforma móvil.....	62
Tabla 3.12. Longitud de actuadores al girar la plataforma móvil en el eje Y.....	62
Tabla 3.13. Giro en el eje Z de la plataforma móvil	63
Tabla 3.14. Longitud de actuadores al girar la plataforma móvil en el eje Z.....	63
Tabla 3.15. Resumen de igualdades entre longitudes de piernas para los 6 tipos de movimientos	64
Tabla 3.16. Posiciones límite de la plataforma en el plano YZ	66
Tabla 3.17. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones límite del plano YZ	67
Tabla 3.18. Posiciones límite de la plataforma en el plano XZ	68

Tabla 3. 19. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones límite del plano XZ.....	69
Tabla 3.20. Posiciones límite de los puntos adicionales.....	70
Tabla 3.21. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones límite de los puntos adicionales	70
Tabla 3.22. Posiciones máxima y mínima de la plataforma en el eje Z	71
Tabla 3.23. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones máxima y mínima de la plataforma móvil en el eje Z	71
Tabla 3.24. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano YZ (mm)	73
Tabla 3.25. Secuencia de valores de los actuadores para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano YZ (mm).....	73
Tabla 3.26. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano YZ.....	76
Tabla 3.27. Error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano YZ.....	76
Tabla 3.28. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano XZ (mm).....	77
Tabla 3. 29. Secuencia de valores de los actuadores para obtener la superficie máxima de trabajo en el plano XZ (mm).....	77
Tabla 3.30. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XZ.....	79
Tabla 3.31. Error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XZ.....	79
Tabla 3.32. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en los planos de puntos adicionales (mm).....	80
Tabla 3.33. Secuencia de valores de los actuadores para hallar la superficie máxima de trabajo en los planos de puntos adicionales (mm).....	80
Tabla 3.34. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo máxima en los planos de puntos adicionales	83
Tabla 3.35. Error medio en la obtención de la superficie de trabajo máxima en los planos de puntos adicionales.....	83

Tabla 3.36. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano XY (mm).....	84
Tabla 3.37. Secuencia de valores de los actuadores para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano XY (mm)	84
Tabla 3.38. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XY	87
Tabla 3.39. Error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XY.....	87
Tabla 3.40. Corrección del error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano YZ.....	88
Tabla 3.41. Error medio en el espacio de todos los movimientos en puntos límite	88
Tabla 3.42. Posición y orientación de giro máximo en el eje X (Ψ)	93
Tabla 3.43. Longitud de actuadores en la posición y orientación de giro máximo en el eje X (Ψ).....	93
Tabla 3.44. Posición y orientación de giro máximo en el eje Y (θ)	94
Tabla 3.45. Longitud de actuadores en la posición y orientación de giro máximo en el eje Y (θ)	94
Tabla 3.46. Posición y orientación de giro máximo en el eje Z (α)	95
Tabla 3.47. Longitud de actuadores en la posición y orientación de giro máximo en el eje Z (α)	95

Índice de gráficos

Gráfico 3.1. Secuencia de longitud de los actuadores D1-D2-D4-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano YZ.....	74
Gráfico 3. 2. Secuencia de longitud de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano YZ.....	74
Gráfico 3.3. Superficie de trabajo en el plano YZ.....	75
Gráfico 3.4. Secuencia de longitudes de los actuadores D1-D4 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ.....	77
Gráfico 3.5. Secuencia de longitudes de los actuadores D2-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ.....	78
Gráfico 3.6. Secuencia de longitudes de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ.....	78
Gráfico 3.7. Superficie de trabajo en el plano YZ.....	78
Gráfico 3.8. Secuencia de longitudes de los actuadores D1-D4 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el del plano de puntos adicionales.....	81
Gráfico 3.9. Secuencia de longitudes de los actuadores D2-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el del plano de puntos adicionales.....	81
Gráfico 3.10. Secuencia de longitudes de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el del plano de puntos adicionales.....	81
Gráfico 3.11. Superficie de trabajo en el plano XZ de los puntos adicionales	82
Gráfico 3.12. superficie de trabajo en el plano YZ de los puntos adicionales	82
Gráfico 3.13. Secuencia de longitudes de los actuadores D1-D4 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XY.....	85
Gráfico 3.14. Secuencia de longitudes de los actuadores D2-D5 en el de obtención de la superficie de trabajo en el plano XY	85
Gráfico 3.15. Secuencia de longitudes de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XY.....	85
Gráfico 3.16. Superficie de trabajo en el plano XY.....	86

Resumen

Este trabajo de fin de grado se centra en el estudio del problema de posicionamiento inverso de la plataforma robótica Stewart-Gough, una plataforma de estructura paralela de configuración hexápoda.

Este análisis se enmarca dentro de 3 apartados principales, un primer apartado, basado en los cálculos teóricos fundamentales para la obtención de los resultados buscados, generando herramientas de cálculo programadas para facilitar este proceso.

Un segundo bloque, basado en el software CAD-CAE “Autodesk Inventor”, en el cual se diseña y modela un robot funcional y, empleando las herramientas matemáticas del primer bloque, se crean simulaciones capaces de obtener datos simulados, para posteriormente, ser comparados con los teóricos.

Y por último, un tercer bloque basado en el mundo de las impresiones 3D, en el cual se crea un nuevo robot con Inventor, partiendo de cero, pasando después a su impresión real y puesta en funcionamiento, mediante elementos electrónicos programados, para su posterior comparación con los datos teóricos del primer punto.

Capítulo I: Introducción

1.1. Introducción a la robótica

Un robot es un dispositivo electromecánico con capacidad de movimiento y acción, con un cierto grado de autonomía y capaz de desempeñar tareas de forma automática, con un alto grado de inteligencia computacional.

Tiempo atrás, durante la época de la Grecia clásica, e incluso con anterioridad, se pueden encontrar antecedentes de la robótica, aunque no es hasta la aparición de los microprocesadores cuando realmente comienza a definirse “robótica”, tal cuál se conoce actualmente, y, hasta un tiempo después, en concreto, treinta años más tarde, aparecen los primeros robots industriales.

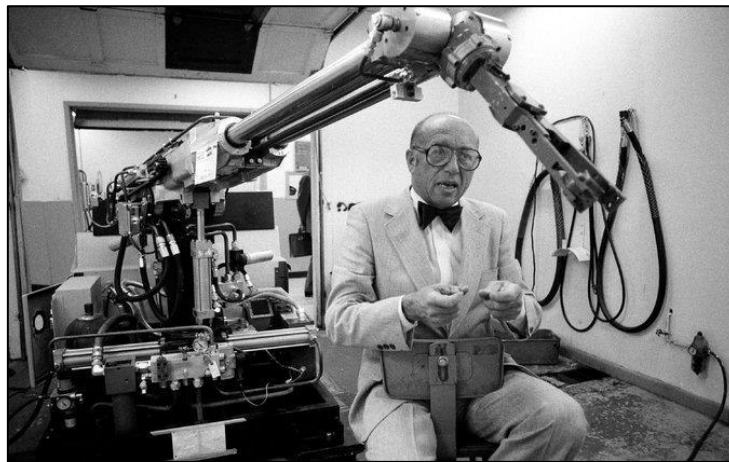


Figura 1.1. Joseph F. Engelberger con su creación, el brazo robótico “Unimate”[23]

En la antigua Grecia, con Herón de Alejandría (85 d.C.), aparecen los primeros automatismos, que ayudan a reducir los esfuerzos y facilitar los trabajos manuales. La tecnología empleada en aquel momento era hidráulica y mecánica, fundamentalmente. A medida que los medios tecnológicos fueron progresando, mejoraron igualmente las posibilidades y prestaciones, desde los mecánicos, con los ingenios de Leonardo Da Vinci (1499), pasando por los mecanismos de relojería, incorporados por J. De

Vaucanson (1738), llegando finalmente, al célebre telar de Jacquard (1801), que admitía programación mediante tarjetas perforadas.

1.2. Robot serial y robot paralelo

Disponemos de una gran variedad en lo que se refiere a tipos de robots existentes en la actualidad, pero en este punto sólo nos centraremos en los robots manipuladores seriales o de cadena cinemática abierta, y los robots paralelos o de cadena cinemática cerrada y en las diferencias entre ambos.



Figura 1.2. Robot serial ABB (a) y Robot paralelo Adept (b). [3] y [2]

Para ello es necesario aportar previamente una definición general de cada tipo de robot y de las características que poseen.

Un robot manipulador serial es una máquina formada por barras conectadas entre sí por pares cinemáticos, consta de una unión fija a una base inmóvil en un extremo, un cuerpo, que suele dividirse en dos partes, el brazo y la muñeca, y un elemento terminal. Este tipo de robot suele imitar la apariencia y la movilidad de un brazo humano, por lo que el denominado “brazo” del robot es el elemento que da la posición requerida al elemento terminal y la “muñeca” del robot es la que proporciona la orientación.

Un robot paralelo es completamente distinto a un robot serial, no sólo en la morfología, sino también en la forma de analizar el mecanismo, como abordare más adelante. La estructura mecánica es más simple, formada por una base fija y una móvil, situadas

una sobre la otra y unidas por un número “n” de piernas , por lo tanto se puede definir un robot paralelo como:

“Aquellos robots en los que el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente”.[1]

Cada una de estas piernas forma una cadena cinemática independiente y están formadas por una serie de distintas articulaciones, siendo normalmente una de ellas el par cinemático actuante y el resto articulaciones pasivas. En función del número de piernas y del tipo de uniones, los robots obtienen distintos grados de libertad, gracias a los cuáles podemos diferenciar distintos tipos de plataformas y robots paralelos.

-Robot paralelo de dos grados de libertad. El robot paralelo Biglide (Fig.1.2.) pertenece a este tipo de robots, con dos grados de libertad, desplazamiento en dos direcciones.



Figura 1.3. Robot paralelo Biglide [4]

-Robot paralelo de tres grados de libertad. Un robot de estas características es por ejemplo el robot Orthoglide (Fig.1.3.), el cuál tiene los tres grados de libertad referidos al desplazamiento en los tres ejes cartesianos [5].



Figura 1.4. Robot Orthoglide [5]

-Robot paralelo de cuatro grados de libertad. El robot Quadrupton (Fig. 1.4) está inspirado en el anterior, el Orthoglide, pero éste incorpora un cuarto brazo mecánico capaz de conferir el giro en un eje, además de los tres grados de desplazamiento que caracterizan a su antecesor [5].



Figura 1.5. Robot Quadrupton [5]

-Robot paralelo de cinco grados de libertad. Esta configuración es muy compleja de conseguir, la manera más usual de conseguir un robot de 5 grados de libertad es mediante un robot híbrido, con la conjunción de dos o más robots que complementen las carencias, en referencia al movimiento, que los robots tengan.

-Robot paralelo de seis grados de libertad. Este es el robot paralelo más complejo de todos, ya que puede desplazarse y girar alrededor de los tres ejes cartesianos. Un robot de este tipo es la plataforma Stewart-Gough (Fig.1.5.).

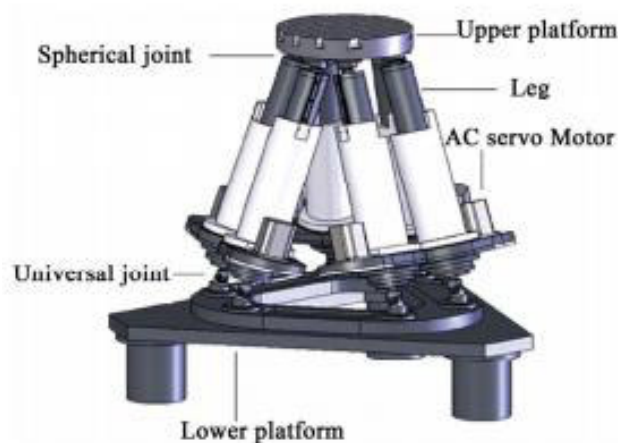


Figura 1.6. Plataforma Stewart-Gough [6]

1.2.1. Comparación entre robot serial y robot paralelo.

La comparación entre los dos robots, es un aspecto muy importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar el tipo de robot que llevará a cabo una tarea concreta, en este análisis, se tienen en cuenta tan solo los aspectos referentes a la estructura y el control de los manipuladores.

En lo referido al apartado estructural, un robot paralelo tiene un montaje mucho más simple y sencillo que el de un robot serial, ya que simplemente es necesario unir cada pierna del robot a ambas bases, la fija y la móvil, esta disposición, proporciona al robot paralelo unas características mecánicas superiores a las de un robot serial.

Al estar todas las piernas unidas a la base, la inercia del propio robot es considerablemente menor, por lo que las velocidades de accionamiento del robot paralelo son superiores a las de cualquier manipulador serial. Las cargas y esfuerzos a las que se ve sometida una plataforma paralela no son soportadas y transmitidas al completo por cada eslabón, como ocurre en los manipuladores seriales, sino que se reparte de manera equitativa entre cada una de las piernas, lo que permite soportar y desplazar cargas mucho más pesadas.

Como contraparte, esta configuración reduce en gran medida el espacio o volumen de trabajo de la máquina.

Entrando ya en el apartado de control del robot, pero sin dejar de lado la estructura, es importante tener en cuenta el posible error de posición que existe en las máquinas móviles. Cuando las partes actúan una tras otra, el error que tiene cada uno de los pares cinemáticos actuantes se va sumando y acumulando hasta llegar a un error del actuador final, mientras que si cada una de las piernas está unida a la base, el actuador final tendrá un error menor, siendo la media de los errores de posición de cada una de las piernas.

En el análisis cinemático de ambos tipos de manipuladores, se tiene como objetivo la misma finalidad, ser capaces de encontrar la posición y orientación del actuador final conociendo la posición de los pares cinemáticos, lo que se llama "posicionamiento directo", o a la inversa, conocer la posición de los pares cinemáticos sabiendo la posición y orientación del elemento final o "posicionamiento inverso".

Si se desea analizar un robot serial, existen procedimientos generalizados para resolver ambos problemas de manera sencilla, mediante el posicionamiento directo se hallaría la única posición y orientación posible del efector final, y mediante el posicionamiento inverso se encontrarían las diferentes configuraciones de los pares cinemáticos que permiten llegar a dicha posición y orientación. El problema surge en el análisis de los robots paralelos, este trabajo es mucho más complejo, ya que no existe ningún procedimiento general para la resolución de los problemas de posición, es necesario investigar y analizar cada robot individualmente. Lo mismo sucede en los análisis cinemático y dinámico.

Tabla 1.1. Comparación estructural y de control entre robots tipo serie y paralelo

NIVEL	CARACTERÍSTICA	ROBOT SERIAL	ROBOT PARALELO
Estructural	Construcción	Compleja	Simple
	Velocidad de trabajo	Media/baja	Alta
	Capacidad de carga	Media/baja	Alta
	Volumen de trabajo	Grande	Pequeño
	Consideraciones de diseño	fuerza, rigidez y vibración	Estructura, espacio de trabajo, singularidades y interferencias entre eslabones
Control	Error	Acumulado	Promedio
	Solución cinemática directa	Sencilla y única	Muy compleja
	Solución cinemática inversa	Compleja	Sencilla y única

De las consideraciones presentadas, se puede concluir que, para un trabajo que conlleva un movimiento rápido de cargas pesadas, el robot paralelo es el que adecuado, mientras que el trabajo conlleva un movimiento de cargas más ligeras pero con una precisión de fuerzas mayor, el robot adecuado es un manipulador serial.

1.3. Plataforma Stewart-Gough

Dentro de la amplia gama de robots paralelos, los más interesantes y complejos son los que tienen 6 grados de libertad, dentro de este grupo, la plataforma Stewart-Gough ocupa una posición importante.

El nacimiento de este robot tiene lugar en 1962, cuando los ingenieros Gough y Whitehall necesitaron de una máquina capaz de simular el comportamiento de los neumáticos "Dunlop" de un tren de aterrizaje de un avión [9], pero no fue hasta 1965 cuando se dio el nombre final a este robot, en este año, el inglés D.Stewart implementó el robot para un simulador de vuelo general [10], dando el nombre a la máquina, "Plataforma Stewart-Gough".

Con el paso del tiempo el robot se fue desarrollando, en 1983, Hunt desarrolló el uso de actuadores lineales y juntas universales [7], mejorando así el funcionamiento, desde ese momento hasta ahora, numerosos científicos han continuado con este proceso de desarrollo [8], aunque aún queda mucho camino por recorrer.

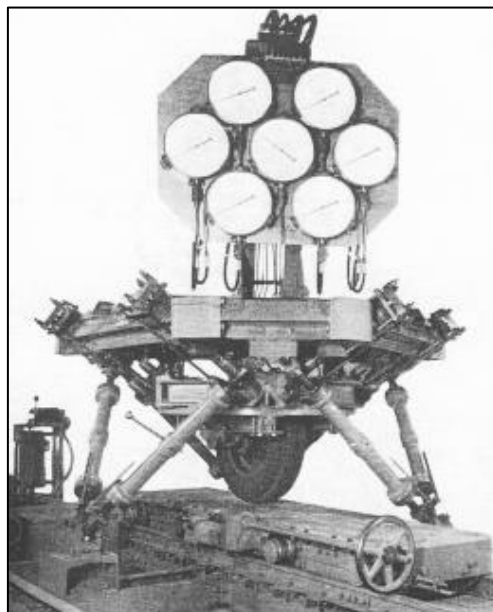


Figura 1.7. Robot de pruebas de neumáticos Dunlop (1962) [1]

Este tipo de robot, como ya se ha explicado con anterioridad, pertenece a los robots paralelos, es decir, consta de dos bases diferenciadas: la parte fija y la parte móvil; y posee seis actuadores prismáticos. Estos actuadores se mantienen unidos a las bases siguiendo un diseño concreto, consiguiendo de ese modo un control de la plataforma

móvil tanto de su posición como de su inclinación, permitiendo movimientos longitudinales, rotacionales e incluso la combinación de ambos aportando al efector final una gran variedad de movimientos y ángulos.

1.4. Aplicaciones de la plataforma Stewart-Gough

Debido a las características propias de este tipo de robots, tiene numerosas aplicaciones reales, pasando desde aplicaciones que requieren de una gran carga hasta algunas que requieren precisiones milimétricas y sumamente cuidadosas.

1.4.1. Máquinas de mecanizado

La elección de este tipo de robot para estructurar y gobernar un robot de mecanizado es obvia, mediante esta plataforma se consiguen grandes precisiones, una gran velocidad de trabajo y sobre todo, una gran rigidez estructural, de este modo, se consiguen crear piezas mecanizadas con una gran precisión y rapidez [15].

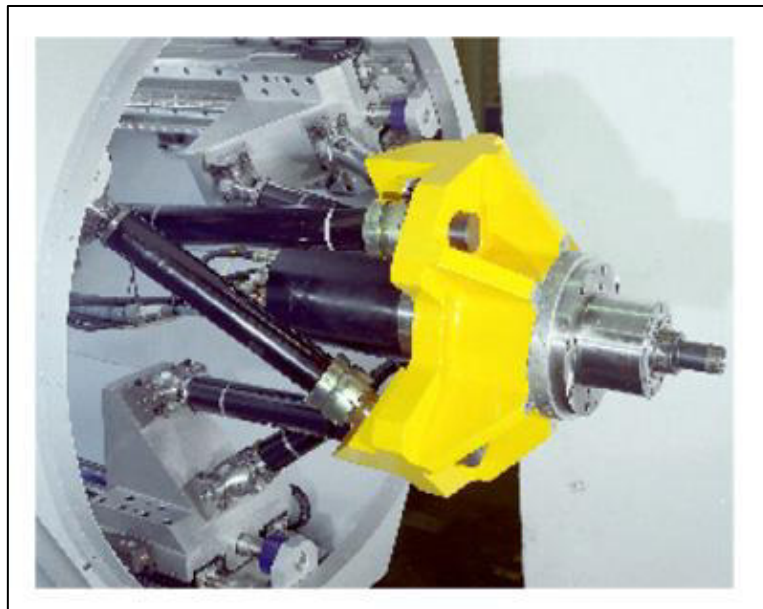


Figura 1.8. Robot Space 5-H de mecanizado de piezas [15]

1.4.2. Simuladores

Este es el uso más extendido para las plataformas Stewart, debido a la capacidad de desplazamiento y giro en los tres ejes cartesianos, a las velocidades y aceleraciones de operación y a la amplia carga que puede soportar y desplazar, ya que en simulaciones reales debe mover al operador u operadores y a la estructura del simulador en sí.

Su empleo en simuladores cubre una amplia gama de ramas, desde simulaciones aeronáuticas, pasando por simuladores automovilísticos e incluso navales, simulando y analizando el comportamiento de líquidos en tanques sometidos a movimientos.

El simulador de vuelo “Eclipse 500”, diseñado por la empresa “Opinicus” para “Eclipse Aviation”, emplea una estructura paralela de 6 grados de libertad del tipo Stewart-Gough [16].



Figura 1.9. Simulador de vuelo Eclipse 500 [16]

Durante 10 años, Honda Performance Development ha estado desarrollando un simulador de carreras para el trazado de Indianápolis, capaz de simular incluso el viento racheado y la degradación de los neumáticos [17].



Figura 1.10. Simulador automovilístico desarrollado por HPD [17]

La plataforma “Aquilon”, diseñada por la empresa “Symétrie”, es capaz de simular el comportamiento de un tanque lleno de líquido, y analizar el comportamiento que sufre, se trata de un robot con una capacidad de carga de 6 toneladas muy empleado en la industria naval [18].

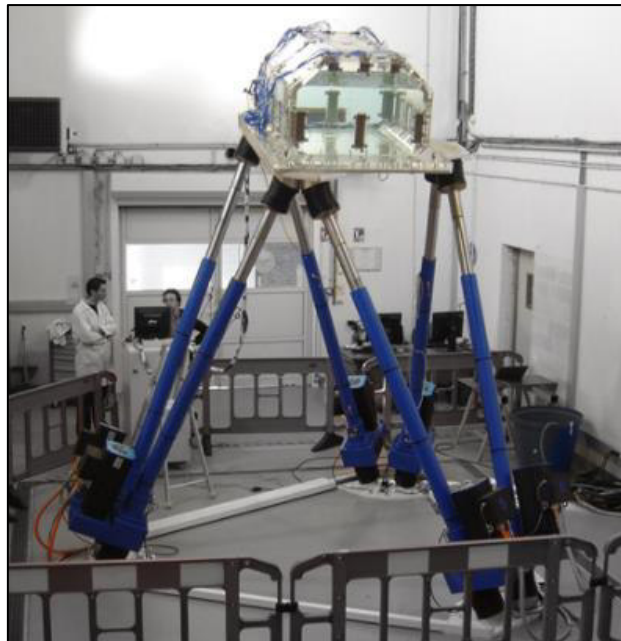


Figura 1.11. Simulador Aquilon [26]

1.4.3. Posicionamiento de antenas satélite

La capacidad de giro y desplazamiento del robot es una característica muy favorable a la hora de posicionar una antena para así favorecer la captación de las ondas.

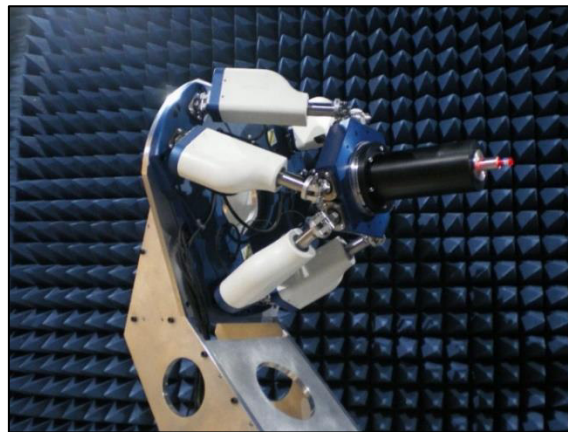


Figura 1.12. Robot hexápodo Brevia [26]

1.4.4. Medicina

El empleo de este tipo de robots también ha entrado en el ámbito de la medicina, por ejemplo una de las aplicaciones de este tipo de estructura es la empleada en el sistema de fijación “Smart Correction”, empleado para fijar la posición de huesos fracturados en el proceso de operación, con la ayuda de un software [19]



Figura 1.13. Sistema de fijación Smart Correction para operaciones de fracturas de huesos [27]

1.5. Objetivos y planteamiento del trabajo

Este trabajo tiene como objetivo central de estudio, un análisis completo del problema de posicionamiento inverso de un robot paralelo hexápodo, denominado comúnmente, “Plataforma Stewart-Gough”.

Dentro del desarrollo del trabajo, se diferencian tres bloques principales, un primer bloque puramente teórico, destinado a la resolución del problema de posicionamiento inverso.

El segundo bloque se centra por completo en el software CAD-CAE “Autodesk Inventor”, empleando la gran variedad de herramientas que proporciona para simular, analizar y verificar los resultados obtenidos en el primer bloque, mediante el diseño y modelado de un robot hexápodo digital.

El tercer bloque basa su desarrollo en el empleo de nuevas tecnologías, para poder verificar y simular los datos teóricos en la realidad, fabricando desde cero, una maqueta compacta y funcional mediante impresiones 3D. Dentro de cada bloque, se busca,:

- Apartado teórico
 - i. Cálculo de las dimensiones básicas de una plataforma real.
 - ii. Cálculo de los grados de libertad del robot.
 - iii. Análisis de diferentes configuraciones de uniones que no limiten los grados de libertad del robot.
 - iv. Resolución del problema de posicionamiento inverso (PPI).
 - v. Programación en Mathematica de un archivo capaz de resolver el PPI para las dimensiones del robot previamente calculadas.
 - vi. Optimización del programa para traducir los valores a datos capaces de generar una simulación en Inventor.
 - vii. Cálculo de patrones existentes en las longitudes de los actuadores, para cada movimiento en un solo grado de libertad.
 - viii. Cálculo de puntos límite de desplazamiento y giro.
 - ix. Adaptación del archivo de Matemática para el cálculo del PPI para las dimensiones reducidas de la maqueta real.
 - x. Optimización del nuevo archivo de Matemática para traducir el resultado longitudinal en un giro adoptable para un microservo.

- Apartado CAD-CAE (Autodesk Inventor)
 - i. Diseño desde cero un robot paralelo Stewart-Gough adaptado a las dimensiones iniciales.
 - ii. Selección de una de las configuraciones de juntas que no limiten los grados de libertad.
 - iii. Selección y obtención del archivo digital de un actuador lineal comercial compatible y óptimo para el robot.
 - iv. Modelado desde cero de cada una de las piezas del robot.
 - v. Ensamblado funcional del conjunto del robot.
 - vi. Simulación de la plataforma posicionada en cada uno de los grados de libertad.
 - vii. Obtención del punto de contacto entre piezas del robot.
 - viii. Simulación de movimiento y obtención de trayectoria entre los puntos límites alcanzables del robot.
 - ix. Análisis, comparación y obtención del error existente en el desplazamiento entre puntos límite.
 - x. Obtención del espacio máximo de trabajo del robot.
 - xi. Simulación por MEF de las piezas más desfavorables del robot.
 - xii. Realización de planos de piezas y del montaje.

- Apartado de construcción de un prototipo
 - i. Selección productos comerciales para gobernar y mover el robot
 - ii. Selección de otra de las configuraciones de juntas que no limiten los grados de libertad.
 - iii. Diseño y modelado de cada una de las nuevas piezas con Autodesk Inventor.
 - iv. Exportación de los archivos de Inventor a la extensión .stl, para que puedan ser utilizados por el interfaz de impresión 3D Simplify 3D.
 - v. Selección del material de impresión.
 - vi. Impresión en 3D de las piezas.
 - vii. Montaje de la maqueta.
 - viii. Diagrama de conexiones y montaje de la parte electrónica.
 - ix. Programación en C++ del archivo de gobierno del robot.
 - x. Simulación de movimientos reales
 - xi. Obtención de planos de piezas y de montaje.

1.5.1. Planteamiento

Aunque todo el trabajo tenga una estructura de tres bloques distintos, la realización se lleva a cabo de manera conjunta, ya que cada uno de los bloques está estrechamente relacionado con los otros dos.

Partiendo de esto, se deduce que, desde un inicio, los primeros pasos de los cálculos teóricos se van encaminando en una dirección que facilite y permita realizar de una manera más sencilla y comprensible el resto de bloques, para ello, el primer paso es seleccionar unas dimensiones base del robot, indispensables para la resolución del PPI y base del diseño de la plataforma de simulación y del prototipo real.

El mismo sentido lleva la obtención de varias configuraciones de juntas que garanticen la conservación de los grados de libertad, de tal manera que puedan emplearse distintas configuraciones para cada robot.

Una vez todos estos pasos previos están completos se pasa a realizar la programación en Mathematica para resolver el PPI y una vez completo se entra en el segundo bloque. Se selecciona el actuador que se va a emplear y, en función de las dimensiones de éste, y de las dimensiones y configuraciones de juntas seleccionadas se diseñan y modelan las piezas del robot, para posteriormente ensamblarlas.

Desde este punto, se empieza a realizar un trabajo conjunto entre los dos primeros bloques, se optimiza el archivo de Mathematica en función del ensamblaje, de manera que, para un trabajo más sencillo, el programa convierta los datos reales en datos aptos para simulaciones.

Siguiendo el proceso de, cálculo con el programa de PPI, simulación en Inventor y comparación de resultados, se obtienen los resultados de los patrones de movimiento, puntos límite de movimiento y obtención de trayectorias por los puntos límite, implementando a medida que se avanza mejoras en la simulación como el análisis y eliminación de contactos entre piezas.

Cabe resaltar que el orden de realización de los tres tipos de simulaciones no es arbitrario, sino que está realizado de una forma concienzuda, de tal manera que los datos obtenidos en la primera simulación, facilitan la simulación de la siguiente, y los resultados de las dos primeras, la simulación de la última.

A partir de todos estos resultados, se calcula el error posicional del robot y se genera un espacio de trabajo en Inventor mediante el tratamiento de datos obtenidos en la simulación de trayectorias límite.

Como añadido, se emplea el entorno de análisis por MEF de Inventor para determinar la resistencia y rigidez de las piezas diseñadas más desfavorables.

Ahora es momento de meterse en el tercer bloque, primero seleccionando los componentes comerciales para el funcionamiento y control del robot, y, en función de sus dimensiones, de las dimensiones iniciales establecidas y otra configuración de juntas distinta se diseña la maqueta a pequeña escala del robot.

Del diseño se pasa al modelado de piezas, y de aquí, seleccionando el tipo de plástico y acondicionando los archivos para su correcta impresión, se crean las partes del robot a tamaño real y se monta todo el conjunto.

Por último, para completar el apartado físico y estructural del robot, se monta la electrónica, se diseña un diagrama de conexiones adecuado y se conectan todos los componentes.

Ahora que solo queda crear el control del robot, se vuelve al primer bloque, donde el programa PPI se adapta a la configuración del prototipo y se optimiza de tal forma que traduzca el desplazamiento del vástago en un ángulo de giro, para que el desplazamiento requerido sea generado por el giro de un servo de manera correcta.

Como último paso antes de generar movimientos automáticos en la plataforma, se crea el programa de gobierno en función de los datos obtenidos del nuevo programa de Mathematica y se introduce en el controlador.

Se ejecuta la simulación real y se observa si, en la realidad, la solución al problema de posicionamiento inverso es correcto.

Como proceso final se crean los planos de todas las piezas diseñadas y, mediante una explosión de los ensamblajes de Inventor, se crean planos de montaje de ambos robots.

Capítulo II: Análisis cinemático de la plataforma Stewart-Gough

2.1. Descripción general

En este apartado se llevarán a cabo los análisis necesarios para poder controlar la posición y el movimiento de una plataforma Stewart-Gough, como ya se ha explicado en capítulos anteriores, el estudio de éste robot paralelo es una tarea compleja que habrá que realizar de una forma completamente distinta a la de cualquier otra máquina móvil.

Al contrario que para un robot serial, en la plataforma Stewart-Gough, un análisis inverso proporciona una única posición posible de los actuadores, mientras que un análisis directo proporciona un número elevado de posibles posiciones finales.

Todos los cálculos se harán inicialmente sin emplear ningún valor numérico, con el fin de conseguir una solución general para cualquier tipo de configuración o dimensiones del robot.

Finalmente se emplea el software Matemática al realizar los cálculos necesarios para determinar las posiciones del robot. Wolfram Matemática es un programa de álgebra computacional muy potente y muy empleado actualmente.

2.2. Dimensiones del robot

El primer paso es definir las dimensiones de la estructura de la base móvil y de la base fija, no de las piezas en sí, sino de los puntos en los cuáles se colocarán las uniones con las piernas.

Las longitudes de las piernas no hay que definir las previamente ya que en sí, ellas son el objetivo de estudio y la solución que se desea encontrar, las únicas dimensiones de las piernas que hay que definir es la variación máxima que pueden adquirir entre su longitud mínima y máxima, pero eso se decide más adelante.

Ambas partes serán iguales e irán situadas una encima de la otra, pero giradas 180 grados respectivamente, con una geometría de hexágono con lados iguales 3 a 3, uno de dimensión "c1" y el otro de dimensión "c2".

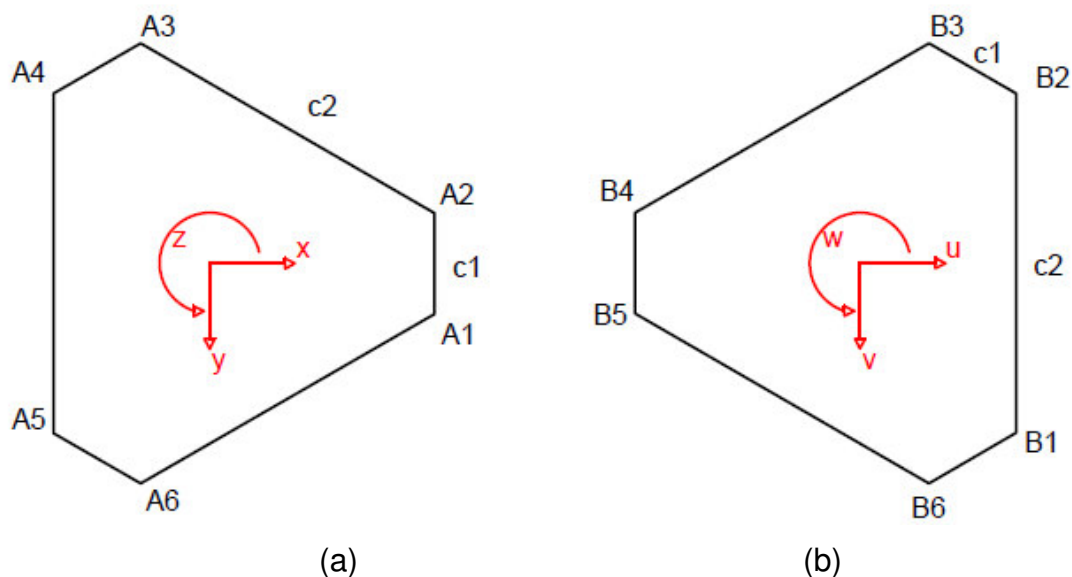


Figura 2.1. Esquema de la base fija (a) y de la base móvil (b).

Cada una de las bases tiene su propio sistema de referencia para poder realizar los cálculos de análisis de posición más adelante, y los vértices de los hexágonos son los puntos de unión entre las piernas, por tanto, es necesario conocer las coordenadas de cada uno de los vértices.

Tabla 2.1. Coordenadas de los vértices de la base fija (a) y de la base móvil (b)

(a)				(b)			
Coordenadas base fija				Coordenadas base móvil			
	X	y	z	u	v	w	
A1	$\frac{c1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}(2 \cdot c2 + c1)$	0	B1	$\frac{c2}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 + 2 \cdot c1)$	0
A2	$-\frac{c1}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}(2 \cdot c2 + c1)$	0	B2	$-\frac{c2}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 + 2 \cdot c1)$	0
A3	$-\frac{c1 + c2}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 - c1)$	0	B3	$-\frac{c1 + c2}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 - c1)$	0
A4	$-\frac{c2}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 + 2 \cdot c1)$	0	B4	$-\frac{c1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}(2 \cdot c2 + c1)$	0
A5	$\frac{c2}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 + 2 \cdot c1)$	0	B5	$\frac{c1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}(2 \cdot c2 + c1)$	0
A6	$\frac{c1 + c2}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 - c1)$	0	B6	$\frac{c1 + c2}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{6}(c2 - c1)$	0

Las piernas del robot serán nombradas por la letra “D”, seguida por el número de pierna, de tal forma que el esquema estructural del robot quedaría de esta forma:

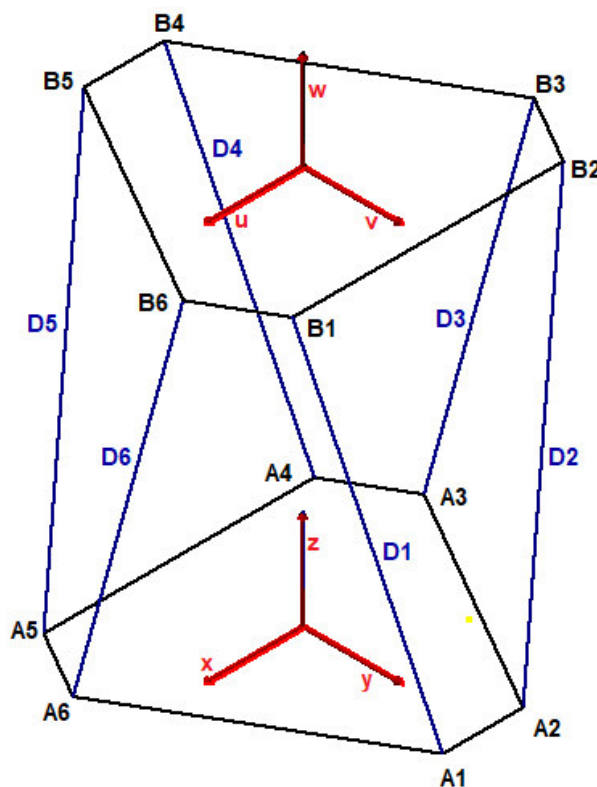


Figura 2.2. Esquema estructural de la plataforma Stewart-Gough

2.3. Grados de libertad

Los grados de libertad de la plataforma dependen exclusivamente de la configuración de la misma y del tipo de pares cinemáticos que lo conforman. Como caso general, cada uno de los brazos o piernas está unido a las bases por juntas esféricas, que actúan como pares cinemáticos pasivos, y en el propio brazo o pierna, se sitúa un par prismático, que es el actuante.

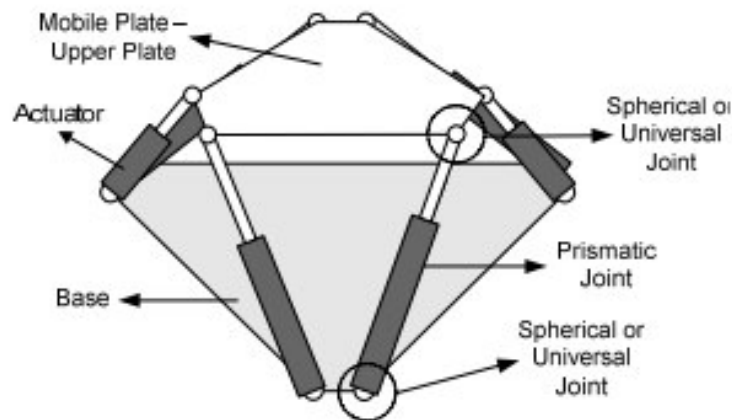


Figura 2.3. Plataforma Stewart Con uniones tipo S-P-S [11]

Empleando la ecuación de Grübler (2.1), se determina, que los grados de libertad de una plataforma Stewart-Gough, de tipo Esférico-Prismático-Esférico, es [12]:

$$m = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (2.1)$$

Donde:

m = Grado de libertad del mecanismo

λ = Grado de libertad del espacio del mecanismo

n = Número de eslabones del mecanismo

j = Número de pares cinemáticos

f_i = Grados de libertad de cada par cinemático

Para este mecanismo en concreto, $\lambda = 6$, ya que se trata de un robot espacial ($\lambda = 3$ en caso de ser bidimensional), $n = 14$ eslabones, las dos bases y seis piernas formadas por dos eslabones unidos mediante una junta prismática, $j = 18$ pares, tres por cada una de las conexiones entre bases, $f_i = 3$ para los pares esféricos y $f_i = 1$ para los pares prismáticos.

Por tanto, sustituyendo y operando con estos valores en la ecuación de Grübler (2.1), se determina que $m = 12$ grados de libertad. Esto es un resultado erróneo, ya que en el espacio sólo pueden existir, como máximo 6 grados de libertad, por lo cual se puede deducir, que existen 6 grados de libertad pasivos, uno por cada pierna y derivados de una de las uniones esféricas. Teniendo esto en cuenta, pueden despreciarse estos 6 grados de libertad pasivos y determinar que el robot posee 6 grados de libertad.

Esta singularidad permite hacer cambios en la estructura del robot, cambiando las uniones y así suprimir los grados de libertad pasivos.

Una opción es cambiar una de las juntas esféricas por dos pares cinemáticos cilíndricos, llamado comúnmente junta universal, permitiendo el giro alrededor de dos ejes perpendiculares, de esta manera, las componentes de la ecuación (2.1) pasan a ser: $\lambda = 6$, $n = 20$ eslabones, debido a la pieza que hay que insertar en lugar de la junta esférica, $j = 24$ pares, ahora son 4 por cada una de las piernas, $f_i = 3$ para el par esférico y $f_i = 1$ para los pares prismáticos y los cilíndricos. Operando se demuestra que $m = 6$ grados de libertad.

La otra posibilidad es cambiar ambas uniones esféricas por dos juntas universales, como en el caso anterior, y además permitir también el giro en el par prismático, es decir, permitir que el vástago del cilindro se desplace y gire, así, las componentes pasan a ser: $\lambda = 6$, $n = 26$ eslabones, $j = 30$ pares, 5 por cada pierna y $f_i = 1$ para los pares prismáticos y los cilíndricos, pero teniendo que cuenta que en el actuador existen dos, uno cilíndrico y uno prismático, por lo que el sumatorio de grados de libertad de cada par es igual a 36, dando como resultado que el mecanismo tiene 6 grados de libertad absolutos.

2.4. Análisis de posición

Para el análisis de posición del robot, ya se han definido los sistemas de referencia coordenados $A(x,y,z)$ y $B(u,v,w)$, pertenecientes a la base fija y a la base móvil respectivamente. Los seis grados de libertad propios del robot, se dividen en tres grados de desplazamiento y tres grados de rotación, referidos al sistema cartesiano coordenado de la base fija $A(x,y,z)$.

En adelante, la posición de la base móvil será referida en términos de desplazamiento en el eje X, desplazamiento en el eje Y y desplazamiento en el eje Z, mientras que la

orientación será referida en términos de giro respecto al eje X, definido por el ángulo “ Ψ ”, giro respecto al eje Y, valor dado por el ángulo “ θ ” y el giro en Z, definido por “ α ”.

Como puede observarse en la imagen (), cada una de las longitudes de las piernas puede expresarse como una ecuación vectorial de la propia longitud (d_i), las coordenadas de las uniones entre la pierna y las bases fija (a_i) y móvil (b_i) y la posición del cuerpo móvil respecto al cuerpo fijo (\vec{P}), el cual se define por los tres desplazamientos en la base coordenada fija.

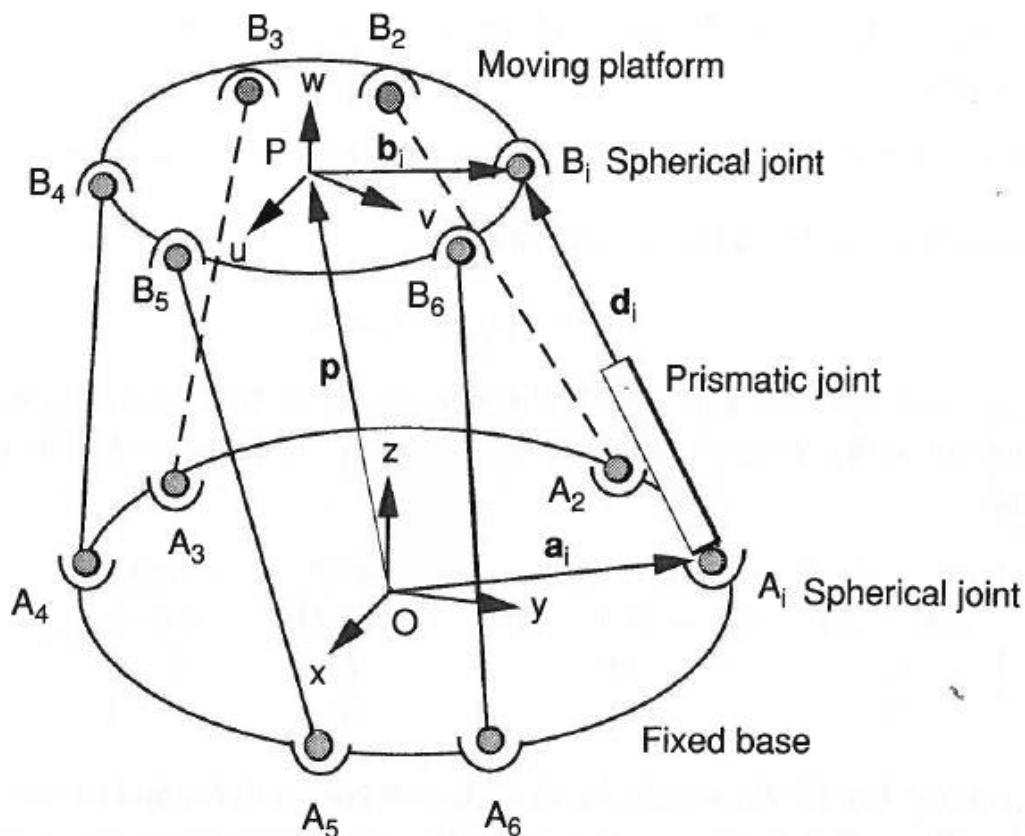


Figura 2. 4. Representación vectorial de la plataforma Stewart-Gough [12]

Los vectores de coordenadas de las uniones de la base móvil están referidos al sistema de coordenadas B, por lo tanto, para poder efectuar la operación es necesario referenciar estos vectores a la base A, que es la base de referencia de todo el sistema, para ello, es necesario caracterizar la orientación del sistema B respecto al sistema cartesiano A, en base al teorema de Euler:

“Cualquiera de los dos sistemas coordenados ortonormales pueden estar relacionados por una secuencia de rotaciones (no más de tres) sobre ejes coordenados, donde dos rotaciones sucesivas no pueden realizarse sobre el mismo eje”[14].

Esta relación se establece mediante matrices ortogonales de orientación [13]. Al tener tres ángulos de giro, se emplean tres matrices ortogonales, una por cada giro en cada eje cartesiano, fijados por los ángulos de Euler (Ψ, θ, α) [14] definidos anteriormente.

$$(R_{x,\psi}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$(R_{y,\theta}) = \begin{pmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$(R_{z,\alpha}) = \begin{pmatrix} c_\alpha & -s_\alpha & 0 \\ s_\alpha & c_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

La matriz de orientación, se define:

$$(R_B^A) = (R_{z,\alpha})(R_{y,\theta})(R_{x,\psi}) \quad (2.5)$$

Operando sucesivamente:

$$(R_B^A) = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\theta & c_\alpha s_\theta s_\psi - s_\alpha c_\psi & s_\alpha s_\psi + c_\alpha s_\theta c_\psi \\ s_\alpha c_\theta & c_\alpha c_\psi + s_\alpha s_\theta s_\psi & s_\alpha s_\theta c_\psi - c_\alpha s_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la ecuación vectorial finalmente queda así:

$$\overline{A_i B_i} = P + R_B^A b_i^B - a_i \quad (2.7)$$

Multiplicando la ecuación por ella misma se obtiene la longitud de cada pierna para valores de $i=1,2,3,\dots,6$.

$$d_i^2 = [P + R_B^A b_i^B - a_i]^T [P + R_B^A b_i^B - a_i] \quad (2.8)$$

2.4.1. Análisis de posición inverso

Como ya se ha definido con anterioridad, el análisis de posición inverso consiste en la obtención de la posición de los pares cinemáticos de un robot conociendo la orientación y posición de un eslabón, en este caso, se obtiene la longitud de los actuadores conociendo la posición y orientación de la base móvil respecto a la fija. Para llegar a ello, se desarrolla la ecuación (2.9):

$$d_i^2 = P^T P + b_i^{B^T} b_i^B + a_i^T a_i + 2P^T [R_B^A b_i^B] - 2P^T a_i - 2[R_B^A b_i^B]^T a_i \quad (2.9)$$

Finalmente, se obtiene el valor de la longitud de los actuadores para $i=1,2,3,\dots,6$. Donde a_i y b_i son valores de coordenada fijas de cada una de las bases y P y R_B^A son los valores que definen la orientación y posición de la plataforma móvil.

$$d_i = \sqrt{P^T P + b_i^{B^T} b_i^B + a_i^T a_i + 2P^T [R_B^A b_i^B] - 2P^T a_i - 2[R_B^A b_i^B]^T a_i} \quad (2.10)$$

2.4.2. Análisis de posición directo

El análisis de posición directo genera muchos más problemas y es mucho más complejo de llevar a cabo que el indirecto. En este caso, conociendo la longitud de los actuadores se desea encontrar la posición y orientación que adquiere la plataforma móvil.

Numerosos estudios se han realizado sobre este problema, pero aún ninguno ha llegado a una solución cerrada, mediante el método de Newton-Rhapson¹, numerosos autores han formulado teoremas de aproximaciones, autores como Ku [18], Liu y col. [19] y Song y Kwon [20], estos últimos llegando a limitar el número de soluciones en 20 soluciones directas, no en 4096 como se obtienen inicialmente.

¹ Método de Newton-Rhapson: Algoritmo numérico empleado para encontrar las raíces de una función real

Capítulo III: Modelado y simulación del robot con Autodesk Inventor

3.1. Autodesk Inventor

“Autodesk Inventor es un software de diseño de modelado sólido mecánico 3D desarrollado por Autodesk para crear prototipos digitales en 3D.”[21], es decir, se trata de un software muy potente de diseño asistido por computadora (CAD), pero Inventor no se queda aquí, el software tiene implementados numerosos módulos o entornos que permiten efectuar simulaciones y análisis cinemáticos, dinámicos, vibratorios, tensionales y térmicos, lo cual permite a este programa entrar dentro de los software CAD (Computer Aided Design) – CAE (Computer Aided Engineering).

Dentro de este gran abanico de posibilidades, este trabajo se centra en ambas partes, una fase de diseño y modelado de piezas, en la cual se crean las partes del robot, una a una, y posteriormente se ensamblan perfectamente para configurar el robot deseado y pasar a la siguiente fase, la fase de simulación y análisis, dividiendo ésta en varias etapas, una de simulación y análisis de movimientos máximos para obtener el espacio de trabajo y los ángulos máximos de giro, otra de análisis tensional y una última de simulación real de una posible aplicación.

3.2. CAD: Diseño y modelado del robot

3.2.1. Diseño y modelado de las piezas

Antes de comenzar con la creación del robot, es necesario realizar un paso previo, definir la configuración de pares que se va a emplear y realizar un esquema previo.

El proceso de diseño y modelado de elementos es un procedimiento bastante sencillo e intuitivo. Primero se crea un nuevo archivo "Pieza", en el cual se conforman los modelos digitales, designados siempre por la extensión ".ipt". Una vez dentro del software, se ha de seleccionar uno de los tres planos del espacio (XZ, YZ, XY) para dibujar el primer boceto de la pieza, una vez hecho esto, se extruye dicho boceto en las dimensiones requeridas para generar el objeto deseado.

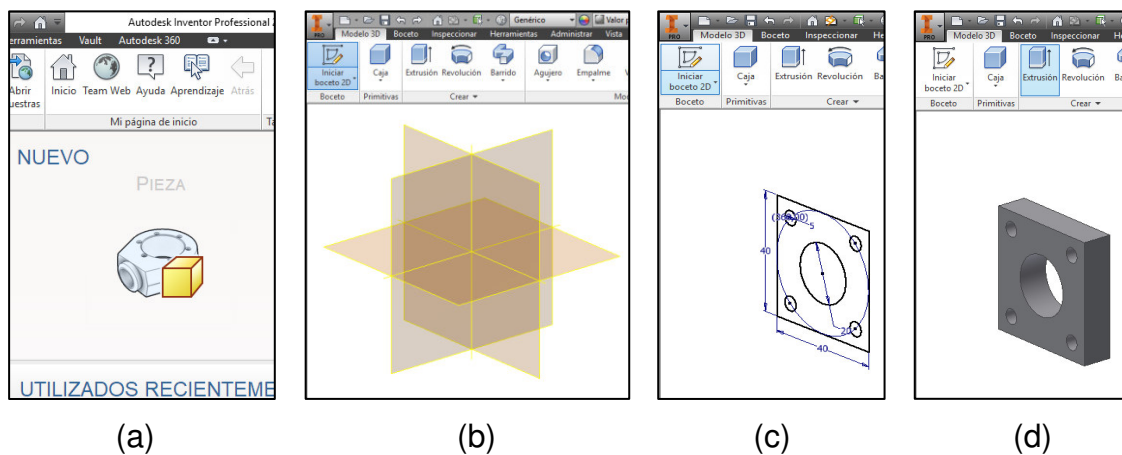


Figura 3.1. Pasos a seguir para crear una pieza en Autodesk Inventor

Para crear el objeto final con la forma deseada, se pueden aplicar la gran gama de herramientas que Inventor ofrece para modelado de sólidos y superficies.



Figura 3.2. Herramientas de modelado de piezas de Autodesk Inventor

3.2.1.1. *Diseño previo*

La configuración de uniones de cada una de las piernas seleccionada para el robot, de tal manera que éste mantenga íntegro el número de grados de libertad, es una configuración U-P-U, es decir, unión universal-prismática-universal, con la posibilidad de giro en el para prismático. El esquema inicial queda así:

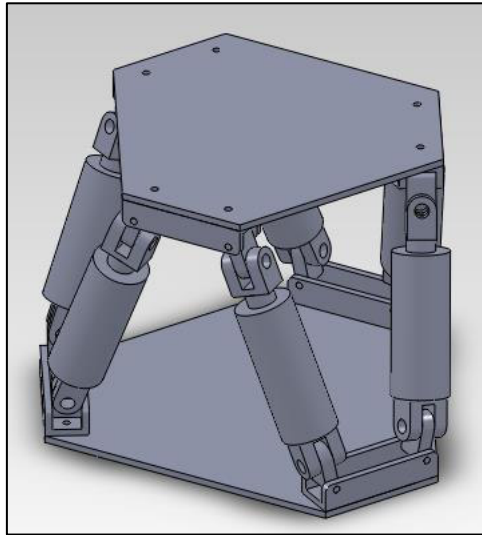


Figura 3.3. Diseño previo de la plataforma Stewart-Gough [22]

3.2.1.2. *Actuador*

El primer paso para modelar el robot es seleccionar el actuador empleado en las piernas, como se desea construir un robot real, el diseño y construcción de un actuador es demasiado complejo de realizar, por ello se escoge un actuador comercial que puede adquirirse en el mercado actual.

El cilindro seleccionado es un actuador lineal servoneumático de posicionamiento de la marca Festo, más concretamente un actuador servoneumático lineal DFPI. La característica principal de este tipo de actuador es que el sistema de medición de recorrido está integrado en el vástago, de tal manera que se evitan posibles errores de medición debidos a injerencias externas, esta es la razón por la que el actuador DFPI es idóneo para el robot.

En la propia página web de Festo [24], se seleccionan las características del actuador que se requieren, en este caso, se configura un cilindro con un diámetro de émbolo de

100 mm, una carrera de 500 mm, con el medidor interno y posición de seguridad en el avance, todo ello basado en la norma “ISO 15552” [24].

Esta configuración proporciona a cada actuador, una fuerza teórica máxima en avance de 4712 N y en retroceso 4417 N, todos estos datos obtenidos de la hoja de datos generada al seleccionar el actuador.

La empresa también proporciona una serie de archivos CAD compatibles con Inventor, los cuáles se emplean para el diseño del robot y del resto de las piezas.

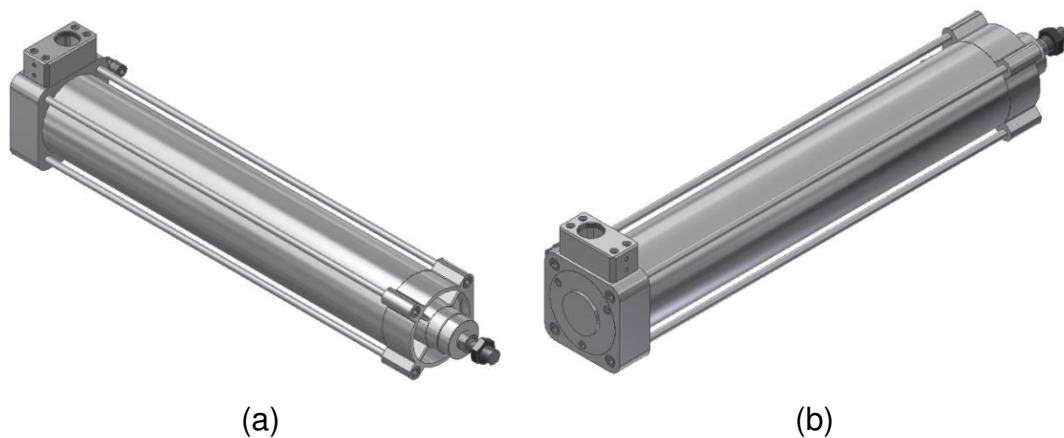


Figura 3.4. Vistas isométricas (a) y (b) del actuador Festo

3.2.1.3. Cabezal “A”

Para la creación de esta pieza, que es la que va unida a la base del actuador (Fig.3.4.b), hay que tener en cuenta las dimensiones de éste último, ya que han de atornillarse a través de los agujeros roscados que la camisa del actuador tiene creados, por lo tanto, el cabezal ha de crearse con agujeros coincidentes a los de la camisa.

Todas las dimensiones de los actuadores pueden obtenerse del propio archivo CAD o de la documentación del producto, este segundo modo es más fiable ya que no da lugar a posibles errores de medición propios. Una vez halladas estas distancias y dimensiones, se modela el resto del cabezal, teniendo en cuenta el modelado de los siguientes objetos.

Se crean dos pilares laterales, entre los cuales se aloja la unión universal, y en ellos se crean agujeros para poder pasar entre ellos los ejes de soporte y los tornillos de anclaje entre ambos.

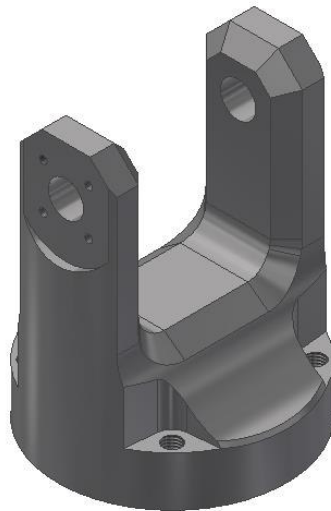


Figura 3.5. Vista isométrica del cabezal A

Este cabezal se emplea en el resto de uniones para simplificar el diseño, por tanto las dimensiones de los agujeros roscados son necesarias para el diseño de la base móvil y la base fija.

3.2.1.4. Cabezal "B"

Para este cabezal se parte del anterior, manteniendo la forma y dimensiones de los pilares y cambiando simplemente la unión de la base, ya que este cabezal es el que se une al vástago del actuador.

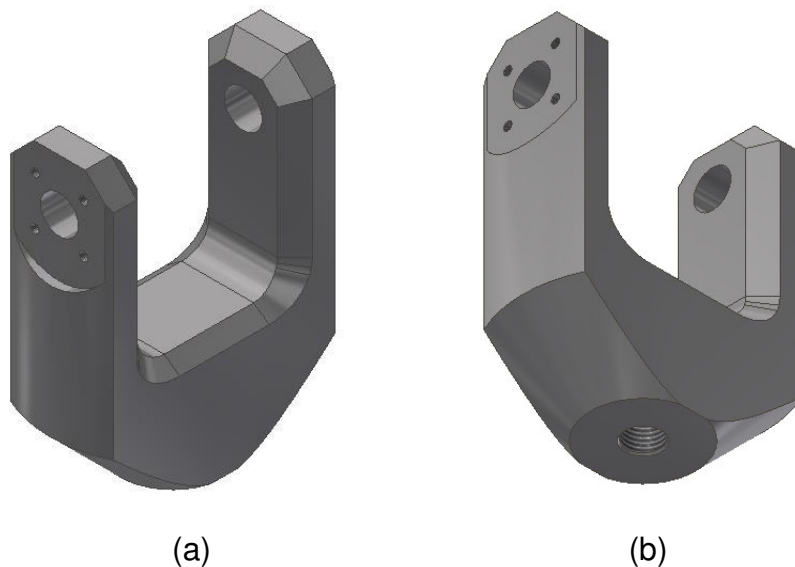


Figura 3.6. Vistas isométricas (a) y (b) del cabezal B

3.2.1.5. Unión universal

Esta pieza proporciona el giro a la unión, para crearla, se parte de un cubo sólido, perforado completamente en 4 de sus caras, de tal manera que, en los agujeros se aloje el eje de cada uno de los cabezales. Para el posterior montaje, se crean huecos alrededor de los agujeros, de poca profundidad, para poder situar en ellos los rodamientos que faciliten el movimiento. También se biselan las aristas del cubo para dar un mejor acabado.

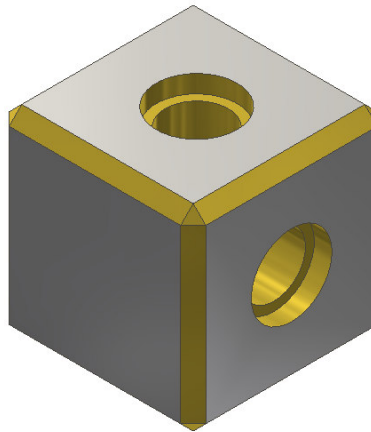


Figura 3.7. Vista isométrica de la unión universal

3.2.1.6. Eje de cabezal

Este eje se diseña en base a los cabezales A y B, creando un eje de soporte que pase por el agujero creado en cada pilar de los cabezales y se una a la unión universal perfectamente, además se crean cuatro agujeros coincidentes con los de los cabezales para poder atornillarlos entre si.

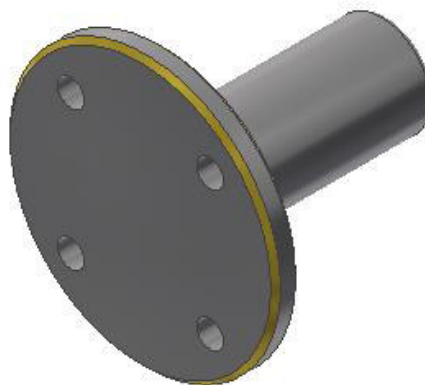


Figura 3. 8. Vista isométrica del eje del soporte

3.2.1.7. Piezas de la base fija

La base sobre la que se sustenta toda la estructura ha de ser rígida, pesada y estable, con el fin de que el robot no se desplace ni se vuelque por el movimiento de los actuadores.

Esta base está formada por varias partes, en total, doce piezas diseñadas de manera eficiente, pudiendo obtener todas fácilmente de una chapa de acero continua, de 1 cm de grosor y 15 cm de ancho, cortando, perforando y moldeando cada una hasta adoptar las medidas requeridas.

Para formar la plataforma fija se requieren 6 chapas de 15x350x1 cm (Fig. 3.9.b), 3 de ellas perforadas con 8 agujeros dispuestos estratégicamente (Fig. 3.9.a), con las dimensiones de la base del actuador, para posteriormente unir las piernas del robot, 3 chapas de 10x350x1 cm (Fig. 3.9.c) que sirven de unión entre las chapas perforadas y las lisas, creando así 3 conjuntos de piezas con forma de doble T, y finalmente otras 3 chapas de unión entre estos 3 bloques, anguladas en uno de los extremos (Fig. 3.9.d).

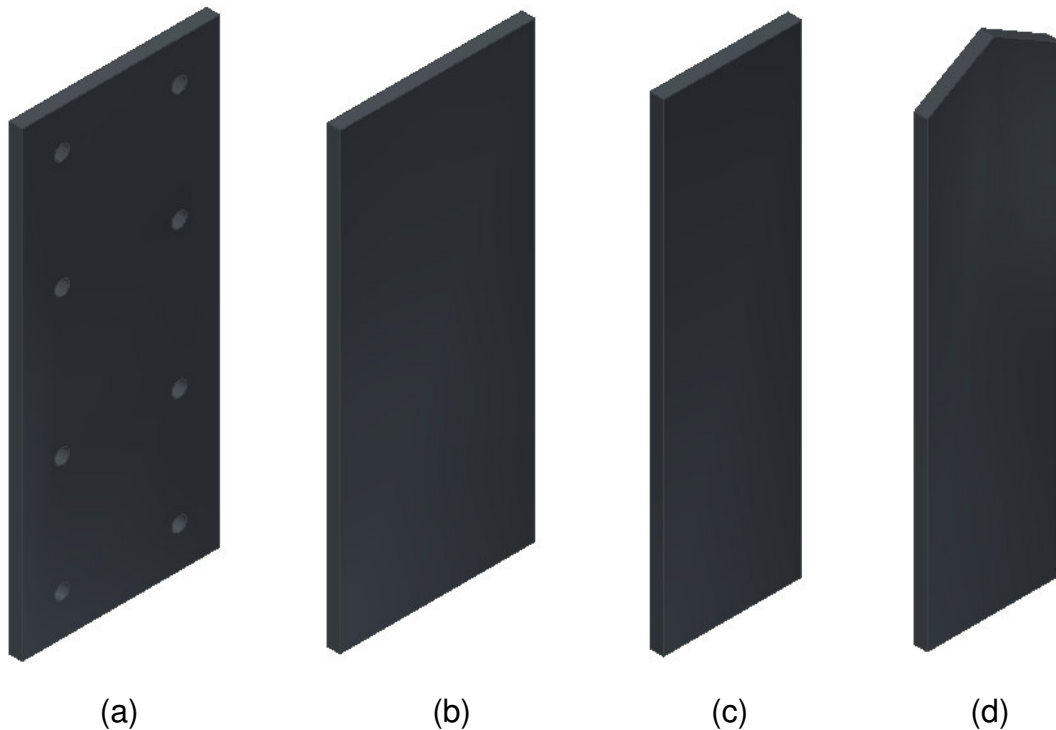


Figura 3.9. Vista isométrica de las piezas (a),(b),(c) y (d) de la base fija

3.2.1.8. Base móvil

La parte superior del robot, al ser una pieza móvil, se requiere que sea ligera, pero rígida para evitar deformaciones y posibles errores al llevar a cabo los distintos movimientos.

El material seleccionado para estas piezas es policarbonato compacto, que es mucho más ligero y resistente que el cristal, aunque como contraparte son flexibles, una característica no deseada, por ello, para evitar la flexión, se disponen nervios de aluminio en dirección radial.

Esta base tiene las mismas dimensiones que la base fija, ya que los cálculos están realizados en base a esa premisa, como consecuencia, también ha de tener los mismos orificios para realizar la unión con las piernas.

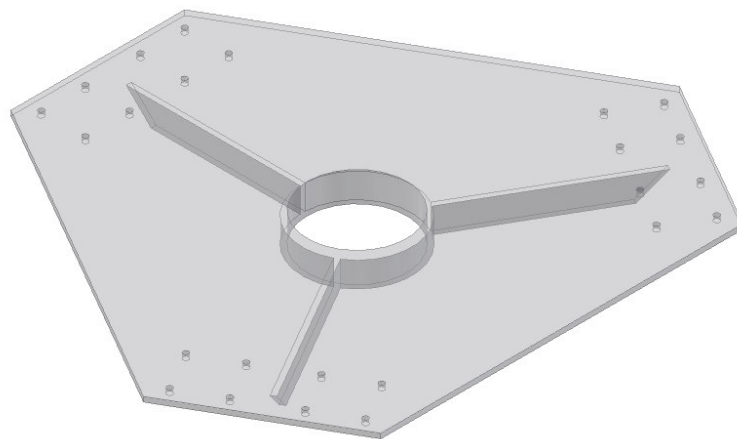


Figura 3.10. Vista isométrica de la base móvil

3.2.2. Ensamblaje del robot

Una vez diseñados todos los componentes del robot, es hora de pasar al montaje, esto se realiza también en Autodesk Inventor, pero se trata de un tipo de archivo distinto, el cual no diseña nuevas piezas, sino que inserta y relaciona entre si las piezas ya diseñadas, estableciendo movimientos relativos entre las piezas para después poder emplear los entornos CAE de simulación.

Es necesario crear un nuevo archivo “Ensamblaje”, que tiene una extensión “.ipn”, y en él, se insertan todas las piezas necesarias, fijando una de ellas como base y relacionando el resto con ella mediante uniones y restricciones.

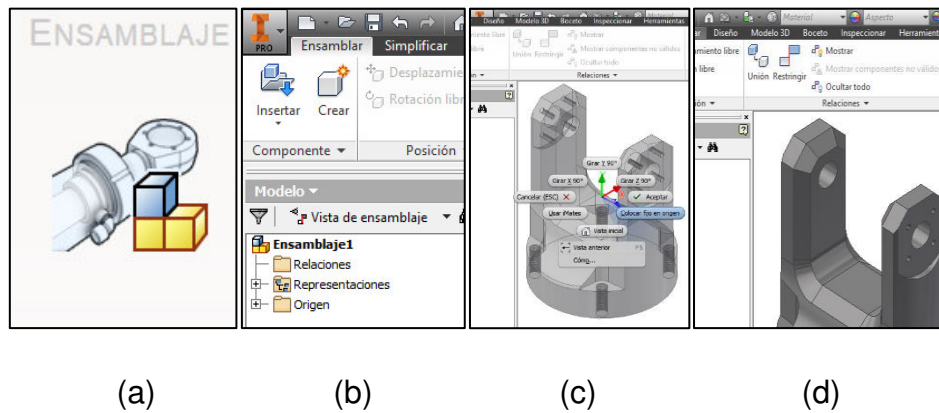


Figura 3.11. Pasos a seguir para crear un ensamblaje con Autodesk Inventor

Este archivo también permite insertar otros ensamblajes dentro de otro, pero los ensamblajes insertados, aunque tengan grados de libertad y movilidad, al ser insertados, los pierden, y son tratados como piezas fijas.

3.2.2.1. Base fija

El primer ensamblaje realizado es la base del robot, construida a partir de las 12 piezas diseñadas en el apartado 3.2.1.7., para ello, se realiza un ensamblaje normal, uniando todas las piezas de la forma deseada, creando primero la parte inferior (Fig.3.12.a), uniando después las piezas transversales (Fig.3.12.b) y finalmente las chapas perforadas en la parte superior(Fig.3.12.c).

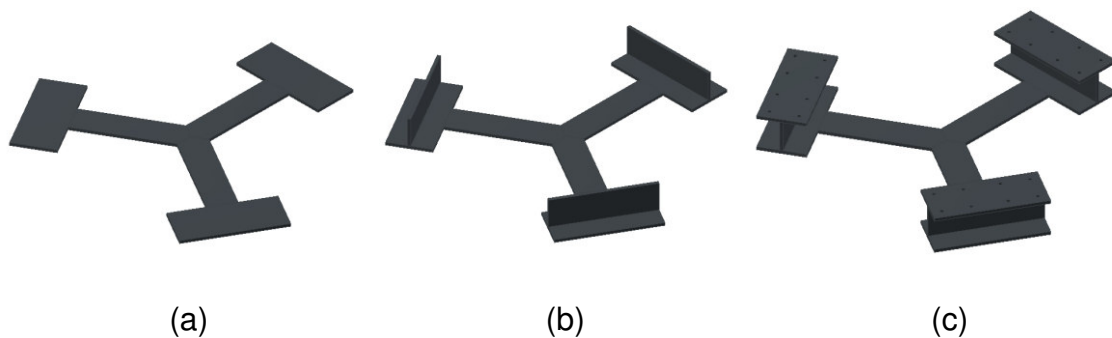


Figura 3.12. Ensamblaje de la base fija

Para crear un archivo digital lo más parecido a la realidad, se utiliza una extensión propia de Inventor llamada “Soldadura”, la cuál permite crear cordones de soldadura en los ensamblajes.

La unión de las piezas de la base en la realidad se hace mediante soldadura, por tanto, lo más indicado es crear estas uniones para que el análisis digital sea lo más semejante a lo que pueda suceder en la realidad.

Al igual que en la realidad, se preparan inicialmente las piezas para poder ejecutar soldaduras correctas. Estos arreglos sólo se realizan en las tres chapas de la unión central (Fig.3.9.d), debido a que son las únicas piezas que se unen en paralelo con otras, se crean chaflanes en las zonas de unión, por ambas caras (Fig. 3.13.), de tal manera que se cree un espacio para que la soldadura penetre correctamente y el material de aportación rellene dicho hueco.

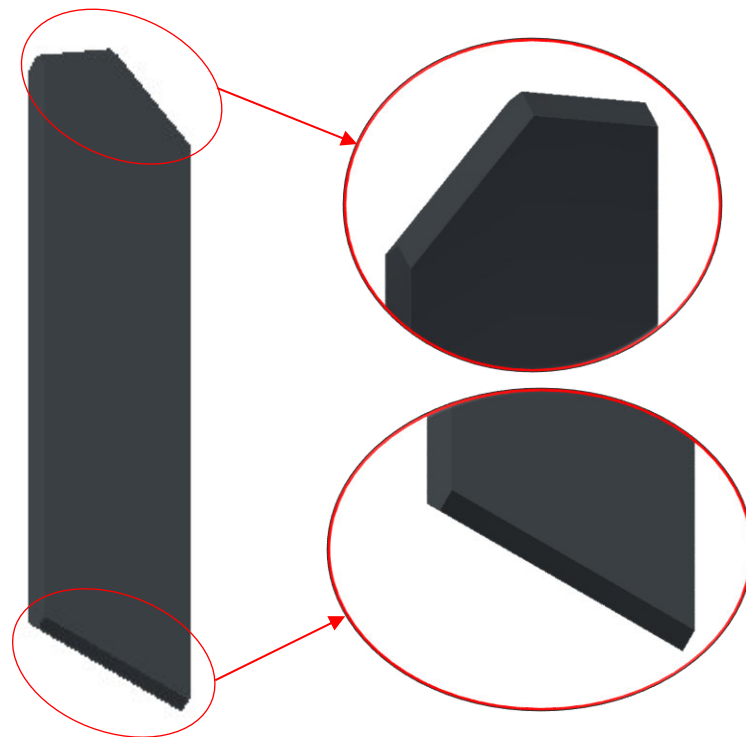


Figura 3.13. Preparación de piezas para soldadura

El siguiente paso es realizar las soldaduras, primero se realizan las soldaduras entre las tres chapas centrales (Fig. 3.14.a), después se suelda el extremo libre de cada una de ellas a las otras tres chapas lisas de la parte inferior (Fig. 3.14.b), lo siguiente es crear una soldadura angular longitudinal entre las chapas lisas inferiores y las chapas perpendiculares, por ambas caras de ésta última y situándolas en el centro de la chapa inferior (Fig. 3.14.c) y el último paso es crear la soldadura entre la pieza

perpendicular y la perforada, de la misma manera que el paso anterior (Fig. 3.14.d), formando una pieza soldada completa, formada por tres bloques en forma de doble T unidas por las tres chapas centrales.

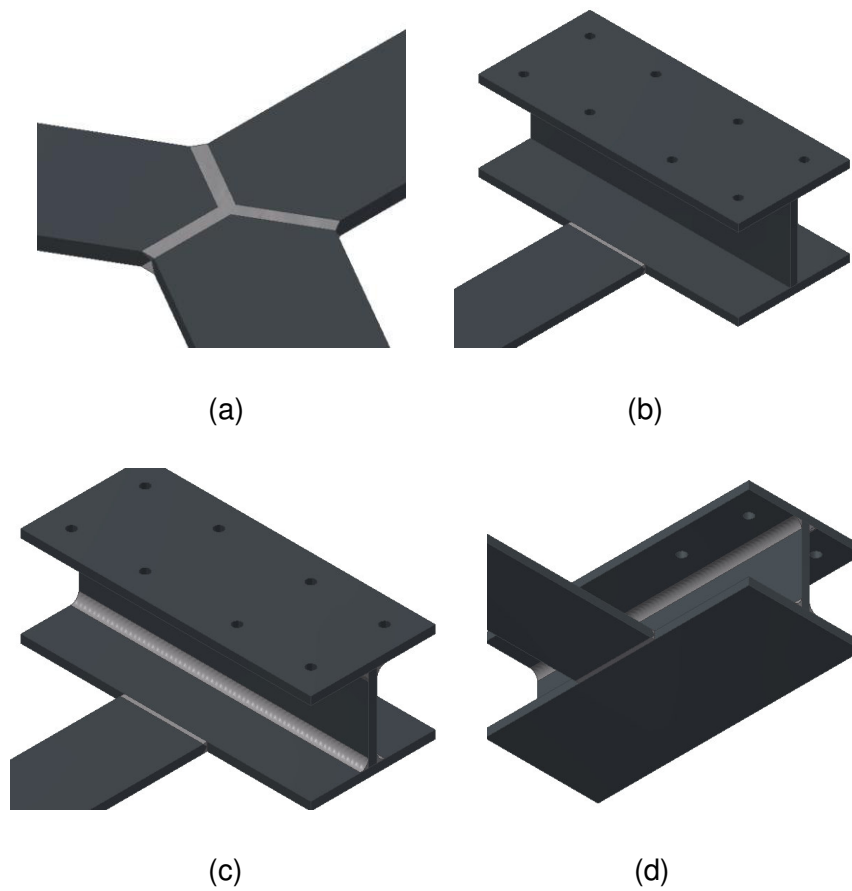


Figura 3.14. Cordones de soldadura de la base fija

Realizando esta unión, las dimensiones finales de la base son iguales a la base superior, premisa que se ha de cumplir, ya que es el apartado fundamental y primario de los cálculos.

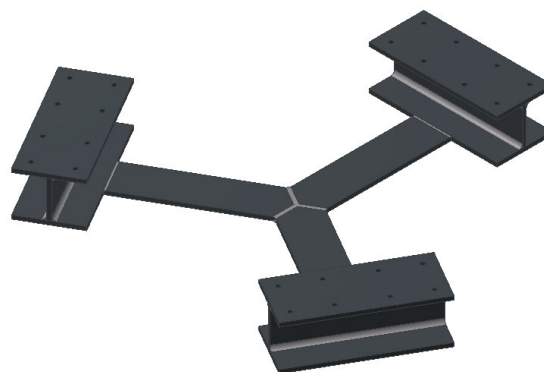


Figura 3.15. Base fija

3.2.2.2. Cabezal A completo

Para facilitar el ensamblaje del robot final, y aunque en el montaje real no se lleve a cabo el proceso de esta manera, se ensamblan primero los cabezales y ejes para así tomarlos en el ensamblaje final como una pieza rígida, ya que entre ellos no debe de existir movimiento.

Se parte de un nuevo archivo ensamblaje en el cuál se inserta el cabezal A (Fig. 3.5) ya creado y dos piezas de eje de soporte (Fig. 3.8.). Se unen las tres en los agujeros creados en los pilares del cabezal y se fijan (Fig. 3.16).

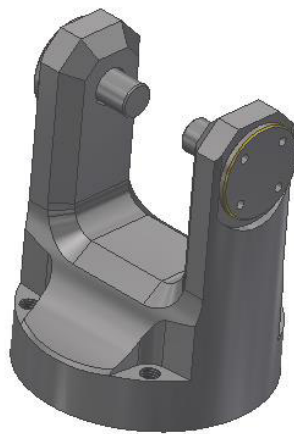


Figura 3.16. Ensamblaje del cabezal A sin fijaciones

Para crear la pieza final (Fig. 3.17) se insertan, desde el centro de contenido propio de Inventor, ocho tornillos de cabeza brochada de dimensiones M5x0.8x20.

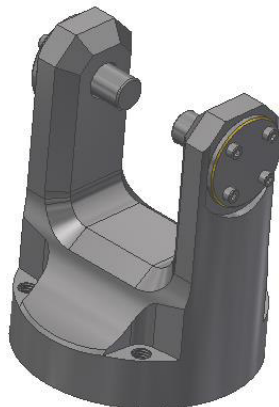


Figura 3.17. Ensamblaje del cabezal A completo

3.2.2.3. Cabezal B completo

El ensamblaje de esta pieza se realiza de modo completamente igual al descrito anteriormente para montar el cabezal A, solo que, claro está, la pieza base es el cabezal B (Fig. 3.6)

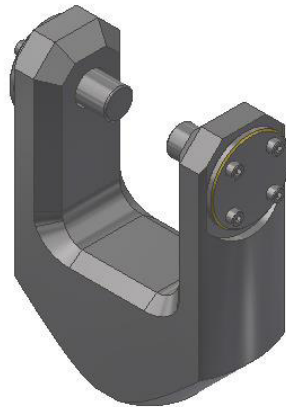


Figura 3.18. Ensamblaje del cabezal B completo

3.2.2.4. Unión universal completa

Se trata de un ensamblaje muy simple, tan sólo consiste en insertar la pieza y cuatro rodamientos del centro de contenido de Inventor, concretamente cuatro rodamientos de bola profunda de 20x37x7 mm, de tal manera que encajen perfectamente en los huecos creados para alojarlos.

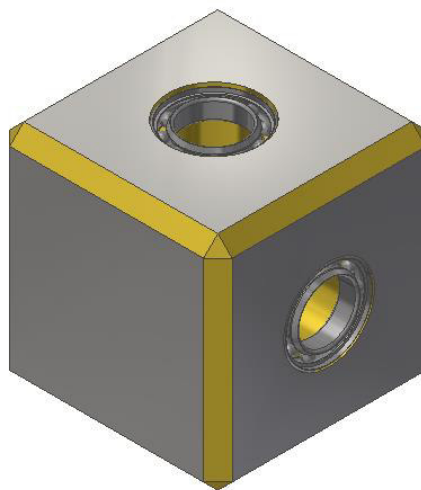


Figura 3.19. Ensamblaje de la unión universal

3.2.2.5. Robot paralelo completo

Ahora que están completos todos los pasos previos es posible montar el robot completo, comenzando con un nuevo archivo en el cual se inserta la base inferior y se coloca fija en el origen de coordenadas.

Se insertan los cabezales A y B y la unión universal para crear la junta inferior (Fig.3.20), uniéndolas entre sí y posteriormente unir las y fijarlas a la base mediante 4 tornillos brochados de cabeza hueca de M10X1.5X50 mm y 4 tuercas de M10 mm, todo ello insertado desde el centro de contenido.

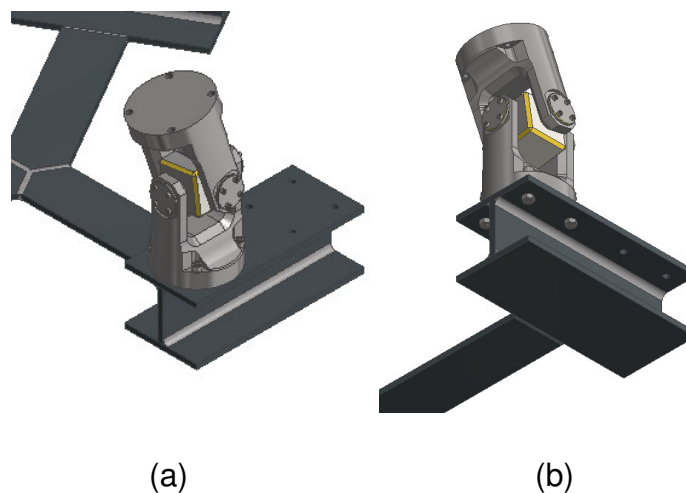


Figura 3.20. Ensamblaje de la junta inferior a la base fija

Una vez construida la junta base, se coloca sobre ella el actuador empleado (Fig.3.21.a), fijándolo mediante tornillos de cabeza de boquilla “ISO 4762” (Fig.3.21.b), de M8x45 mm.

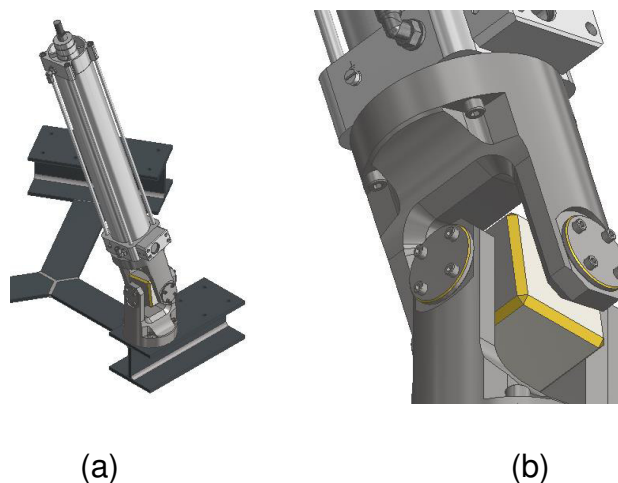


Figura 3.21. Ensamblaje entre el actuador y la junta de la base

Después de esto, se crea la junta superior de la misma forma que la inferior y se une al vástago del actuador (Fig. 3.22), creando así la pierna del robot.

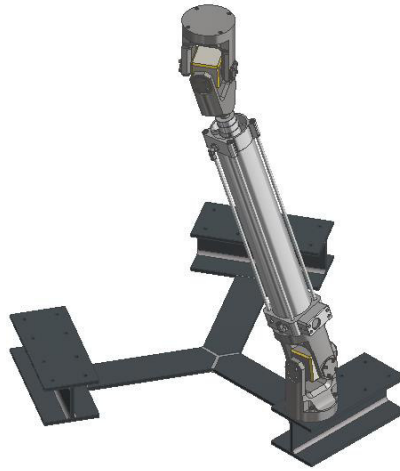


Figura 3.22. Ensamblaje de la pierna con la base fija

Como pasos finales, se copia la pierna completa y se pega 5 veces en el archivo, creando las seis patas necesarias, las cuáles se unen a la base fija del mismo modo que la primera (Fig. 3.23.a), acabando con la inserción y fijación de la base superior a las piernas mediante los mismos tornillos y tuercas empleados en la unión de la base fija (Fig. 3.23.b).

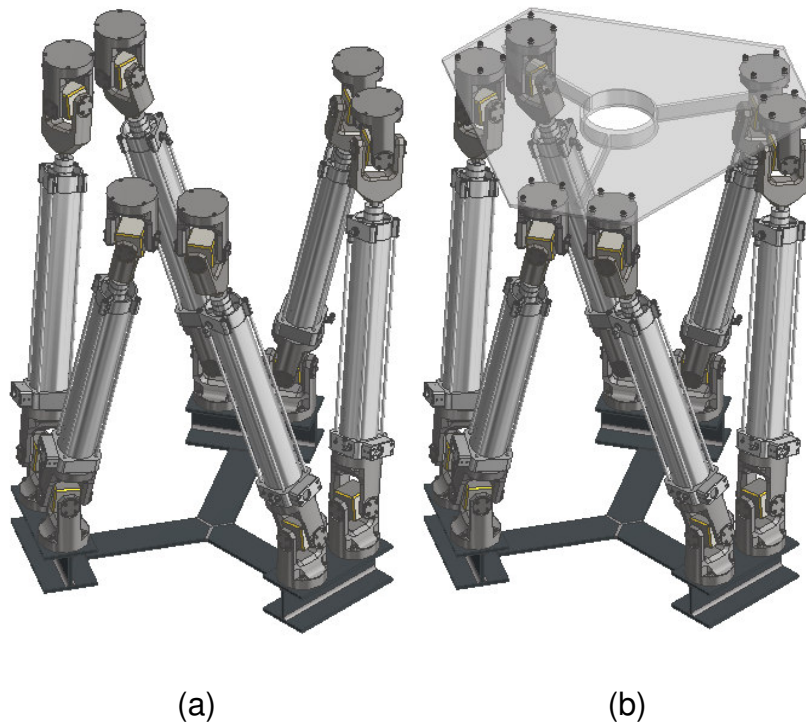


Figura 3.23. Ensamblaje completo de la plataforma Stewart-Gough

3.3. CAE: Simulación y análisis del robot

Inventor posee numerosas herramientas CAE, pero en este apartado, solo se abarcan las referidas a simulaciones dinámicas y resistentes, pero no se trata de simples simulaciones arbitrarias de funcionamiento, sino que se basan en datos teóricos obtenidos previamente, de tal forma, se pueden comparar ambos resultados y demostrar la similitud entre los datos teóricos y prácticos.

- Análisis dinámico: Se realizan varias simulaciones de posicionamiento en función de los datos obtenidos previamente en un archivo de cálculo.
- Análisis tensional: Se realizan tres simulaciones de carga, aplicando valores admisibles para los actuadores, comprobando la resistencia de las tres piezas más susceptibles a sufrir deformaciones.

3.3.1. Cálculos posicionales

Los cálculos previos a las simulaciones se realizan en un archivo de Mathemática mediante las ecuaciones descritas en los puntos 2.4. y 2.4.1., ya que simplemente, el estudio se centra en el posicionamiento inverso del robot.

Se definen las longitudes “c1” y “c2” de las bases del robot, para así definir las coordenadas de los vértices de las uniones. Estas dimensiones son, $c_1=200$ mm y $c_2=675$ mm, obtenidas de las bases ya creadas anteriormente.

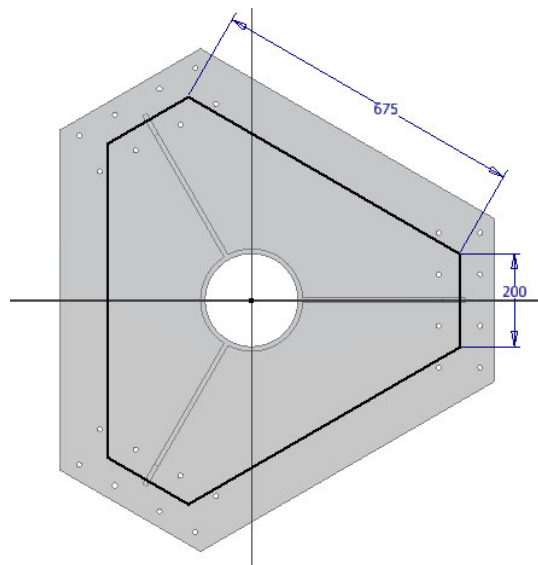


Figura 3.24. Dimensiones analíticas de las bases del robot

Quedan por definir las longitudes mínima y máxima de cada una de las piernas, para este punto, es necesario destacar que la parte que se toma como “Pierna” del robot para los cálculos es tan sólo la parte móvil, por lo tanto, la altura de las bases y la altura de las uniones fijas a éstas se obvian. La estructura alámbrica del robot analizado queda así:

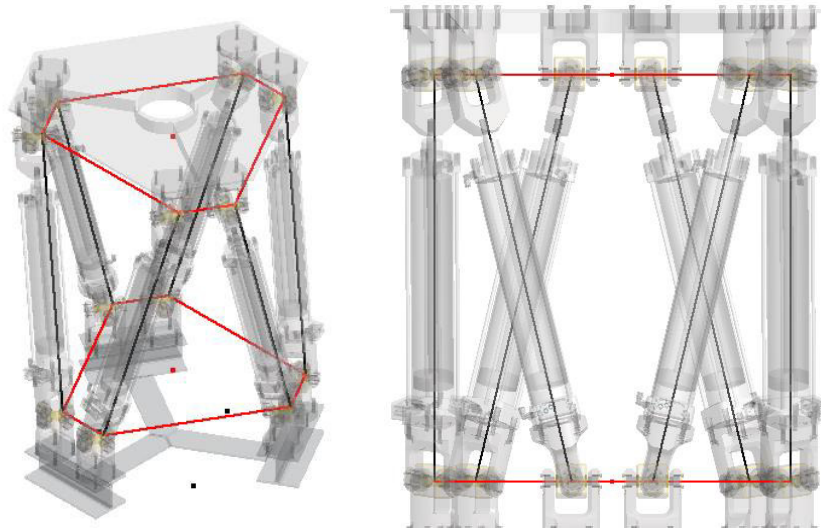


Figura 3.25. Estructura alámbrica real del robot.

Por tanto, las longitudes de los actuadores se obtienen midiendo la distancia entre centros de los ejes de los cabezales unidos al actuador, estando el actuador encogido (Fig. 3.26) y estirado completamente (Fig. 3.27), siendo la longitud mínima 1035 mm y la máxima 1535 respectivamente, lo que concuerda con la carrera de 500 mm seleccionada inicialmente.

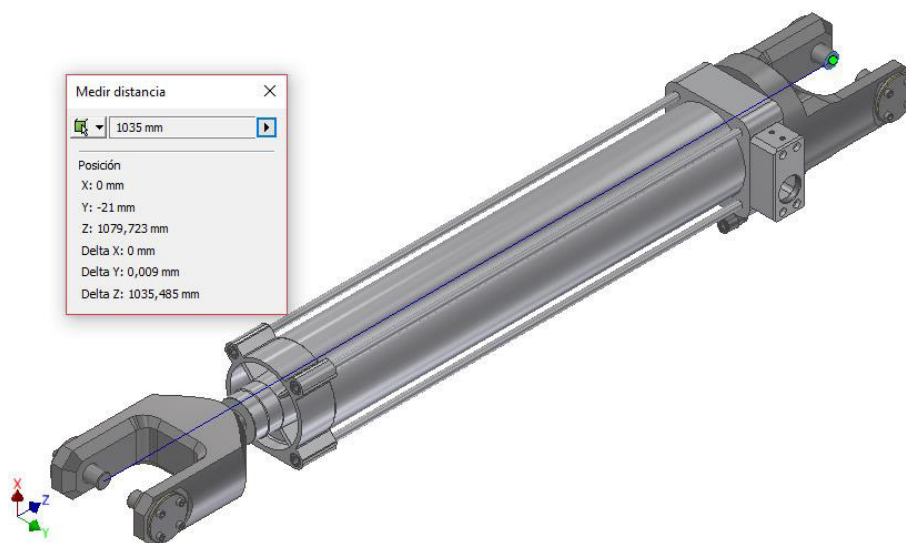


Figura 3.26. Longitud mínima de la pierna del robot

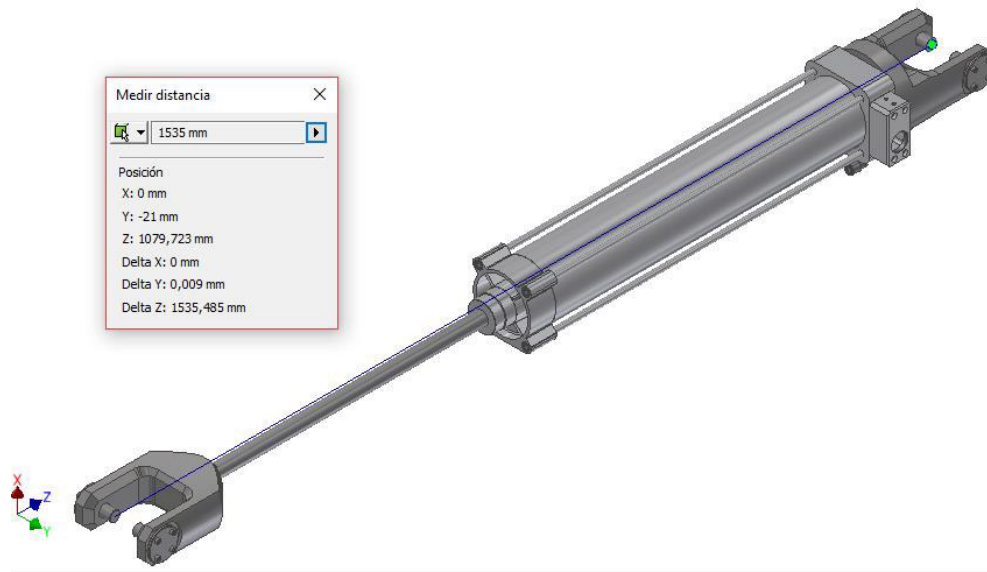


Figura 3.27. Longitud máxima de la pierna del robot

Ya definidas todas las dimensiones iniciales, se realiza el programa completo, en el cuál, se definen las posiciones P_x, P_y y P_z , y los giros Ψ, θ y α , referidos a los ejes X, Y y Z respectivamente, y el programa muestra las longitudes que las piernas adquieren para llegar a dicha posición, mostrando también si la longitud está fuera de las posiciones límites de cada pierna, lo que significa que se trata de una posición $(P_x, P_y, P_z, \Psi, \theta, \alpha)$ que no es posible alcanzar.

Estos datos obtenidos no pueden exportarse tal cuál a Inventor, ya que para realizar simulaciones en Inventor, hay que proporcionar movimiento a las uniones realizadas en el ensamblaje.

La única variable activa, a la cuál se confiere movimiento, es la longitud de carrera de cada actuador, que debido a los modelos obtenidos de los actuadores Festo, varía entre 42,5 mm y 542,5 mm.

Para optimizar el tiempo, se optimiza el archivo de Mathematica para que, directamente, muestre el valor que se debe introducir en cada actuador, dentro de la simulación de inventor, valor que se obtiene restando la longitud mínima del actuador a la longitud obtenida, obteniendo así la longitud de carrera, y posteriormente sumando 42,5 mm para igualar las posiciones mínimas del actuador real y la de su homólogo en Inventor.

3.3.2. Simulación posicional

Para comenzar con las simulaciones hay que sumergirse en el primer entorno CAE de Inventor que se trata en este trabajo, el entorno “Simulación dinámica”, el cuál, permite conferir movimientos a los ensamblajes, mediante cambios posicionales, de velocidades o de aceleraciones, además permite exportar y tratar datos dinámicos obtenidos, de cualquiera de las piezas, tras la simulación.

Para generar las simulaciones, es necesario indicar a cada actuador la longitud de carrera que se desee, y esto, puede hacerse de modo singular, para colocar el mecanismo en una posición, o mediante una secuencia, de tal manera que los valores de carrera vayan variando con el tiempo, y así, generar un movimiento en todo el robot.

En este apartado, se llevan a cabo posicionamientos singulares, para así poder caracterizar y deducir el funcionamiento del robot en cada uno de los grados de libertad que posee.

El primer paso, es definir una posición inicial, a partir de la cuál se generen cambios posicionales singulares en cada grado de libertad, la posición idónea sería la inicial para todos los grados de libertad, pero esta posición es inalcanzable debido a la propia estructura, por ello se selecciona un punto situado sobre el eje Z y sin giro, el óptimo es el punto medio, en el cuál los actuadores están estirados a la mitad de la carrera, ya que, desde esa posición, es posible realizar movimientos en los seis grados de libertad y en sentido positivo y negativo.

Tabla 3.1. Posición media de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255.39	0	0	0

Tabla 3. 2. Longitud de actuadores en la posición media de la plataforma móvil

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1285	1285	1285	1285	1285	1285
Recorrido del actuador (mm)	250	250	250	250	250	250

Es importante en la simulación seleccionar cuál es cada actuador, una configuración que concuerda con la expresada en los cálculos teóricos es la reflejada en la figura 3.28., donde puede observarse como los ejes X,Y y Z y los cilindros D1,D2,D3,D4,D5 y D6 son iguales a los de la figura 2.2.

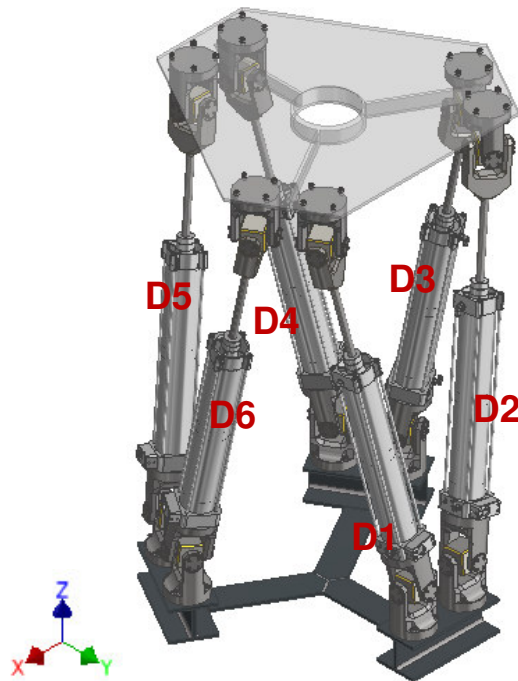


Figura 3.28. Plataforma Stewart-Gough en posición de altura media

Ahora que todos los pasos de preparación se han realizado, se analiza el posicionamiento en cada uno de los grados de libertad, seleccionando los puntos, calculando los valores de longitud de cada actuador mediante el programa “PPI” generado con Mathematica y configurando los pares en Inventos con esos resultados para obtener un resultado visual de los resultados.

En cada uno de los ejes de desplazamiento y giro se realizan varias pruebas, con el fin de comprobar la existencia de algún patrón en la disposición de los actuadores, aunque en el trabajo solo se muestra una posición con el fin de mostrar los resultados.

3.3.2.1. Desplazamiento en el eje X (Px)

Sólo se cambia el valor de Px, manteniendo Pz constante y el resto de valores en 0.

Tabla 3.3. Desplazamiento en el eje X de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
400	0	1255.39	0	0	0

Tabla 3.4. Longitud de actuadores al desplazar la plataforma móvil en el eje X

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1414.64	1273.27	1345.81	1414.64	1273.27	1345.81
Recorrido del actuador (mm)	379.64	238.27	310.81	379.64	238.27	310.81

Tras sucesivas pruebas cambiando valores en este eje, se llega a la conclusión de que, debido a la simetría estructural del robot, la longitud de los actuadores es igual dos a dos (Fig. 3.29), igual para D1 y D4, coloreados en amarillo, para D2 y D5, coloreados en azul, y para D3 y D6, coloreados en magenta.

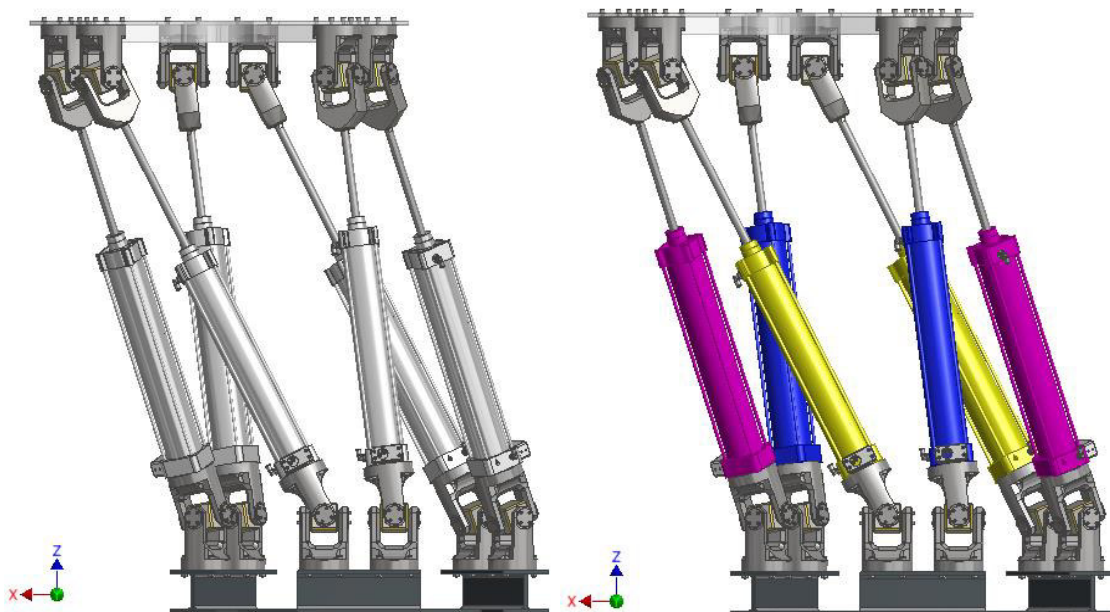


Figura 3.29. Desplazamiento en el eje X de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano XZ)

3.3.2.2. Desplazamiento en el eje Y (P_y)

Sólo se cambia el valor de P_y , manteniendo P_z constante y el resto de valores en 0.

Tabla 3.5. Desplazamiento en el eje Y de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
P_x (mm)	P_y (mm)	P_z (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	500	1255,39	0	0	0

Tabla 3.6. Longitud de actuadores al desplazar la plataforma móvil en el eje Y

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1328.19	1328.19	1474.94	1328.19	1328.19	1474.94
Recorrido del actuador (mm)	293.19	293.19	439.94	293.19	293.19	439.94

Tras sucesivas pruebas cambiando valores en este eje, se llega a la conclusión de que, debido a la simetría estructural del robot, la longitud de los actuadores es igual para D1,D2,D4 y D5 coloreados en amarillo, y para D3 y D6,coloreados en azul (Fig.3.30).

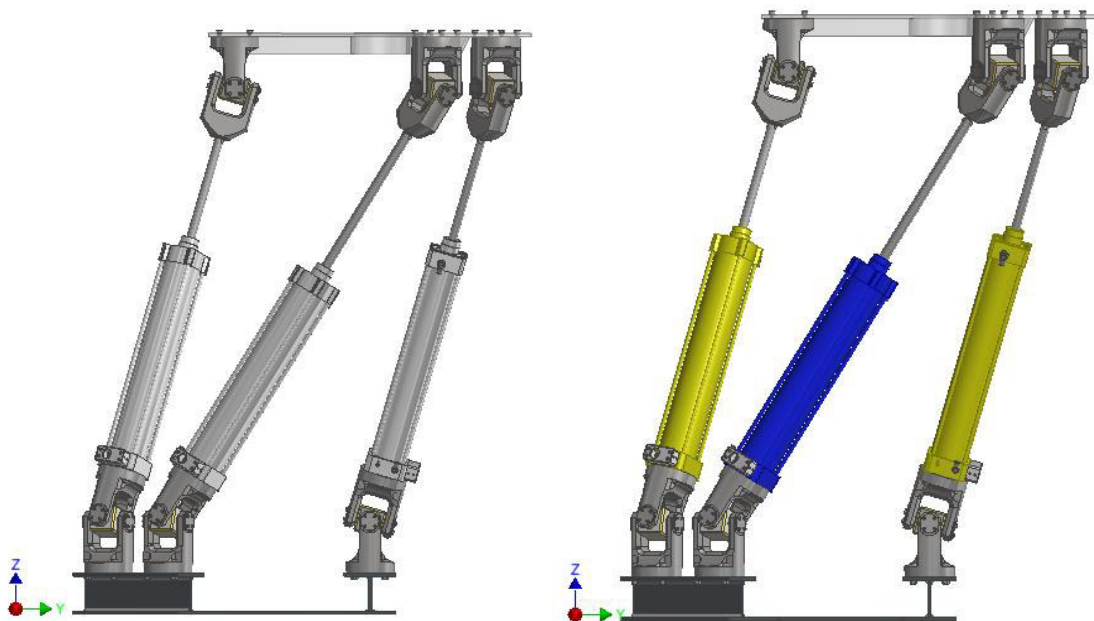


Figura 3.30. Desplazamiento en el eje Y de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ)

3.3.2.3. Desplazamiento en el eje Z (P_z)

Sólo se cambia el valor de P_z , manteniendo el resto de valores en 0.

Tabla 3.7. Desplazamiento en el eje Z de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
P_x (mm)	P_y (mm)	P_z (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1500	0	0	0

Tabla 3.8. Longitud de actuadores al desplazar la plataforma móvil en el eje Z

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1524.86	1524.86	1524.86	1524.86	1524.86	1524.86
Recorrido del actuador (mm)	389.86	389.86	389.86	389.86	389.86	389.86

Tras sucesivas pruebas cambiando valores en este eje, se llega a la conclusión de que, debido a la simetría estructural del robot, la longitud de los actuadores es igual para todas las piernas, coloreadas de amarillo (Fig. 3.31).

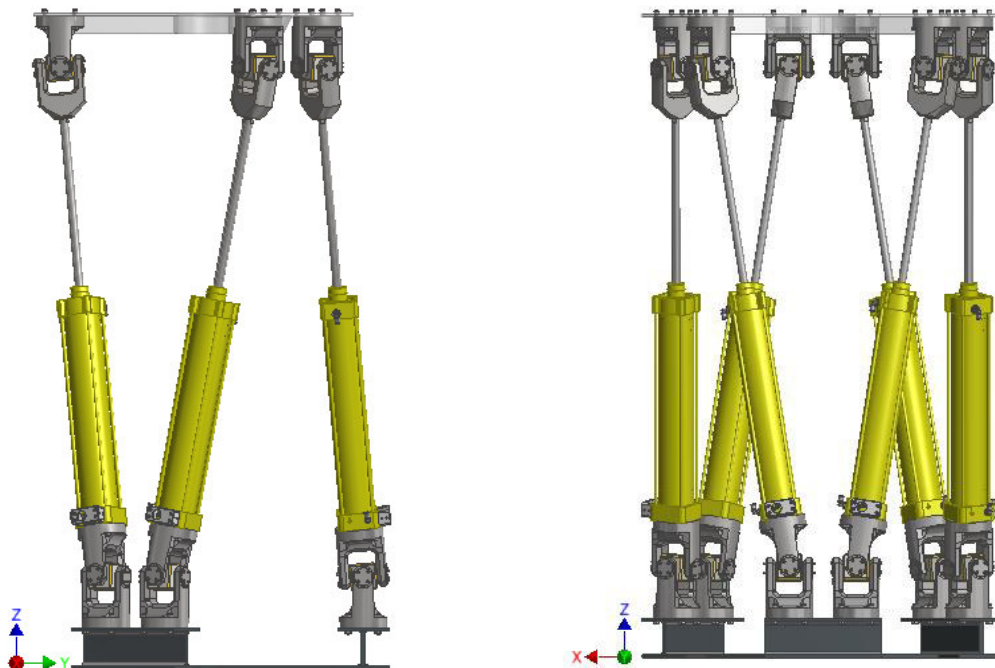


Figura 3.31. Desplazamiento en el eje Z de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ y XZ)

3.3.2.4. Giro en el eje X (Ψ)

Sólo se cambia el valor de Ψ , manteniendo P_z constante y el resto de valores en 0.

Tabla 3.9. Giro en el eje X de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255.39	30	0	0

Tabla 3.10. Longitud de actuadores al girar la plataforma móvil en el eje X

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1441.53	1441.53	1348.45	1061.46	1061.46	1348.45
Recorrido del actuador (mm)	406.53	406.53	26.46	379.64	26.46	313.45

Tras sucesivas pruebas cambiando valores en este giro, se llega a la conclusión de que, debido a la simetría estructural del robot, la longitud de los actuadores es igual dos a dos (Fig. 3.32), igual para D1 y D2, coloreados en amarillo, para D4 y D5, coloreados en azul, y para D3 y D6, coloreados en magenta.

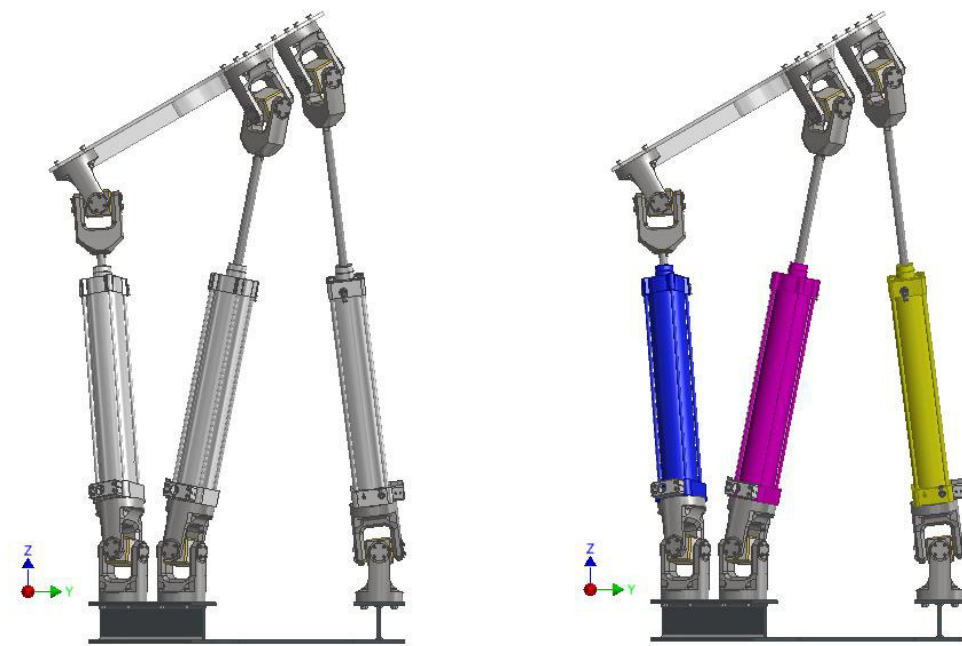


Figura 3.32. Giro en el eje X de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ)

3.3.2.5. Giro en el eje Y (θ)

Sólo se cambia el valor de θ , manteniendo P_z constante y el resto de valores en 0.

Tabla 3.11. Giro en el eje Y de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255,39	0	30	0

Tabla 3.12. Longitud de actuadores al girar la plataforma móvil en el eje Y

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1112.01	1443.59	1500.58	1336.34	1238.84	1073.9
Recorrido del actuador (mm)	77.01	408.59	465.58	301.34	203.84	38.9

Tras sucesivas pruebas cambiando valores en este giro, se llega a la conclusión de que, debido a la simetría estructural del robot, en este caso, no existe ninguna longitud igual, cada una toma un valor distinto, aumentando la longitud las piernas situadas a un lado del eje Y y disminuyendo las del otro lado.

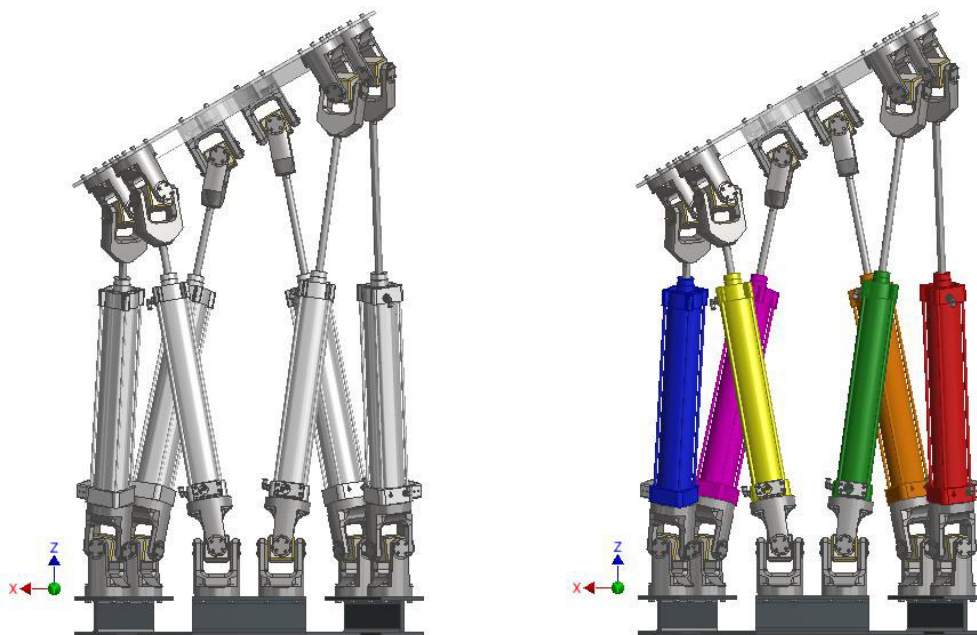


Figura 3.33. Giro en el eje Y de la plataforma Stewart-Gough (Vista de plano YZ)

3.3.2.6. Giro en el eje Z (α)

Sólo se cambia el valor de α , manteniendo P_z constante y el resto de valores en 0.

Tabla 3.13. Giro en el eje Z de la plataforma móvil

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255,39	0	0	30

Tabla 3.14. Longitud de actuadores al girar la plataforma móvil en el eje Z

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1255.98	1348.13	1255.98	1348.13	1255.98	1348.13
Recorrido del actuador (mm)	220.98	313.13	220.98	313.13	220.98	313.13

Tras sucesivas pruebas cambiando valores en este giro, se llega a la conclusión de que, debido a la simetría estructural del robot, la longitud de los actuadores es igual 3 a 3, la longitud de D1 es igual a la de D3 y D5, coloreados de amarillo, mientras que D2 es igual a D4 y a D6, coloreadas en azul (Fig. 3.34).

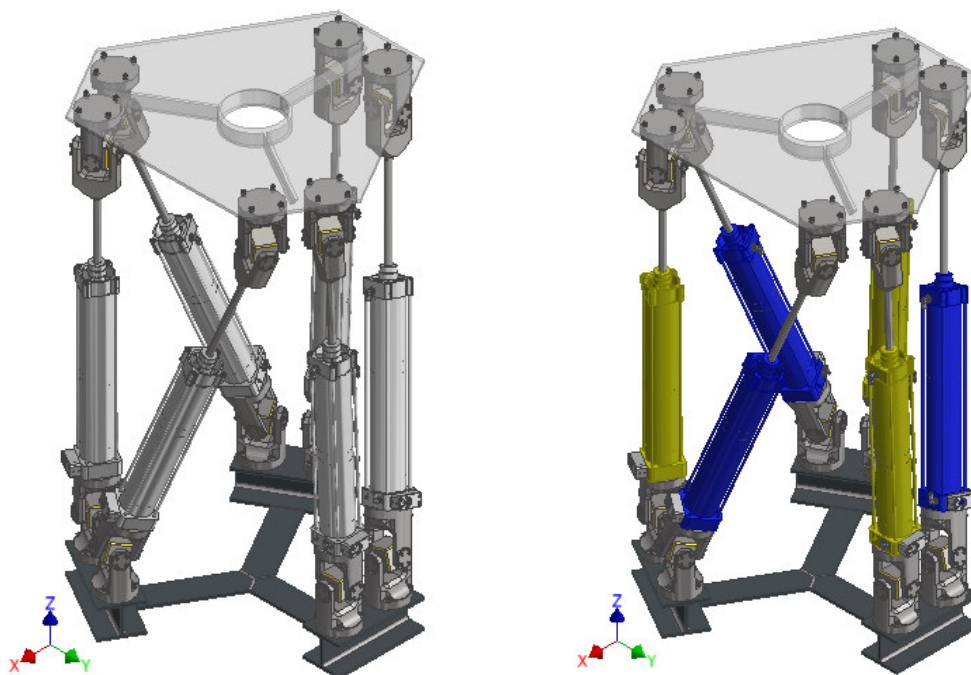


Figura 3.34. Giro en el eje Z de la plataforma Stewart-Gough (Vista isométrica)

Una vez realizadas todas las pruebas, se han encontrado diferentes patrones en la configuración de la longitud de los actuadores, siempre que esta posición solo incorpore desplazamientos o giros en un eje (el desplazamiento Z no se tiene en cuenta ya que es intrínseco a la configuración del robot). En la tabla 3.15 se recogen todos estos resultados, mostrados mediante un cuadro de colores en el que, para cada tipo de posicionamiento, los colores indican igualdad de longitudes.

Tabla 3.15. Resumen de igualdades entre longitudes de piernas para los 6 tipos de movimientos

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Desplazamiento en X	Yellow	Blue	Magenta	Yellow	Blue	Magenta
Desplazamiento en Y	Yellow	Yellow	Blue	Yellow	Yellow	Blue
Desplazamiento en Z	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Giro en X	Yellow	Yellow	Magenta	Blue	Blue	Magenta
Giro en Y	Yellow	Green	Red	Brown	Magenta	Blue
Giro en Z	Yellow	Blue	Yellow	Blue	Yellow	Blue

Para el caso de un movimiento espacial, el problema es mucho más complejo, ya que en función de las combinaciones posicionales entre desplazamientos y giros, tienen lugar configuraciones muy dispares de los actuadores, generando combinaciones de cada posición singular que se ve afectada en la posición espacial.

3.3.3. Espacio de trabajo

Mediante las pruebas de posición efectuadas en el apartado anterior, se ha observado que, las posiciones máximas teóricas del eje Y y del eje X están situadas a una altura de 0 mm en el eje Z, esto supone un conflicto, ya que son posiciones que no pueden adoptarse físicamente debido a que las piernas del propio robot chocarían entre si (Fig. 3.35 y 3.36).

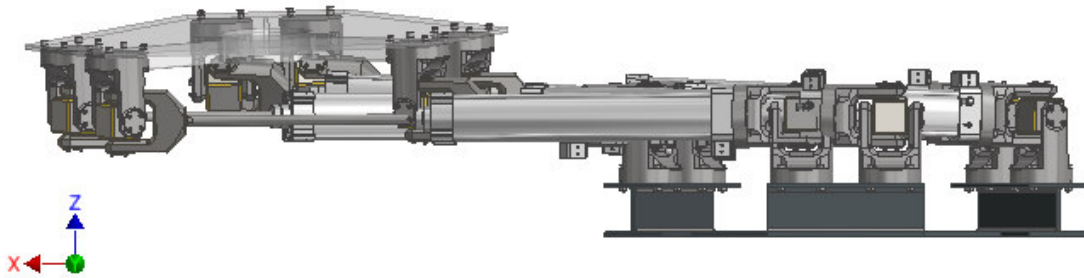


Figura 3.35. Posición máxima teórica del robot en el eje X, plano de vista XZ

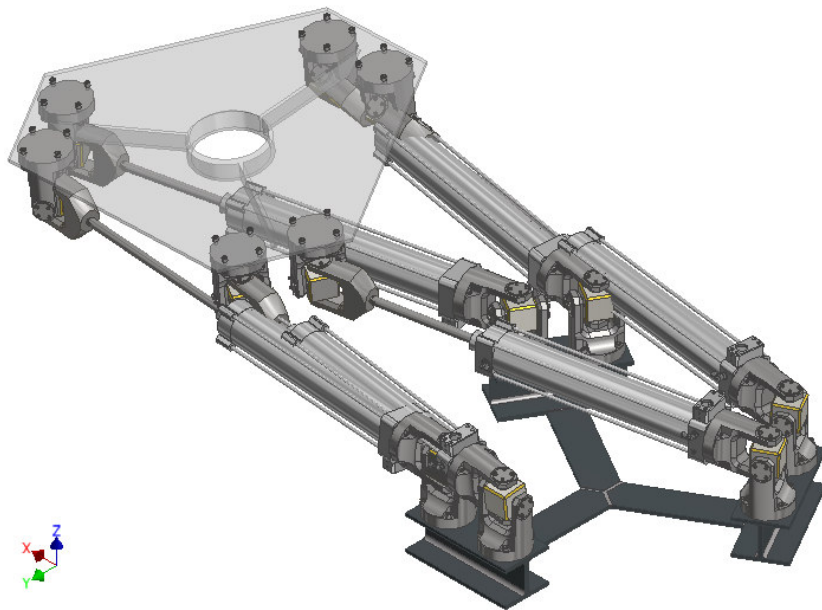


Figura 3.36. Posición máxima teórica del robot en el eje X, plano de vista isométrica

Para obtener un espacio de trabajo lo más amplio posible, pero sin que existan interferencias entre las piernas del robot, es necesario encontrar la coordenada Z mínima, para cada uno de los desplazamientos en los ejes Y y X, a la cual pueda llegar la plataforma sin chocar.

Esta condición podemos obtenerla mediante herramientas de Inventor, de tal forma que el propio programa evita interferencias entre cuerpos, permitiendo desplazar manualmente la plataforma hasta los puntos máximos de los ejes X e Y, con la longitud mínima de Z, de ésta manera se estiman los puntos máximos alcanzables para el robot en los ejes Y y X.

Es importante resaltar, que debido al estudio de posiciones realizado en el punto 3.2.2., se llega a la conclusión de que, para cualquier desplazamiento simple, sin tener en cuenta los giros, en cada uno de los ejes coordenados, al existir siempre, como mínimo, dos piernas de la misma longitud, los puntos máximos alcanzables se obtienen cuando, al menos, dos piernas estén estiradas completamente.

Además todo el estudio del espacio de trabajo se realiza sin generar ningún giro en la plataforma móvil, ya que cualquier cambio en este sentido reduce el desplazamiento en el eje de movimiento.

Para obtener estas posiciones límite, se realizan iteraciones en el programa de Mathematica, cambiando valores para ajustar la altura Z obtenida de inventor y las coordenadas X e Y, de manera que se obtengan, al menos, dos actuadores estirados al límite.

3.3.3.1. Puntos límite en el plano YZ

Existen dos posiciones máximas teóricas, una en sentido positivo del eje Y y otra en sentido negativo, las cuáles son:

Tabla 3.16. Posiciones límite de la plataforma en el plano YZ

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Sentido positivo	0	1225.07	329.03
Sentido negativo	0	-1340.94	339.34

Tabla 3.17. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones límite del plano YZ

	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)
Sentido positivo	126.16	126.16	500	126.16	126.16	500
Sentido negativo	500	500	84.37	500	500	84.37

Se puede observar como se cumple la premisa establecida inicialmente, al menos dos actuadores están completamente estirados en cada uno de los puntos máximos teóricos.

También se puede observar como en este justo punto está el límite de contacto de las piernas de la plataforma.

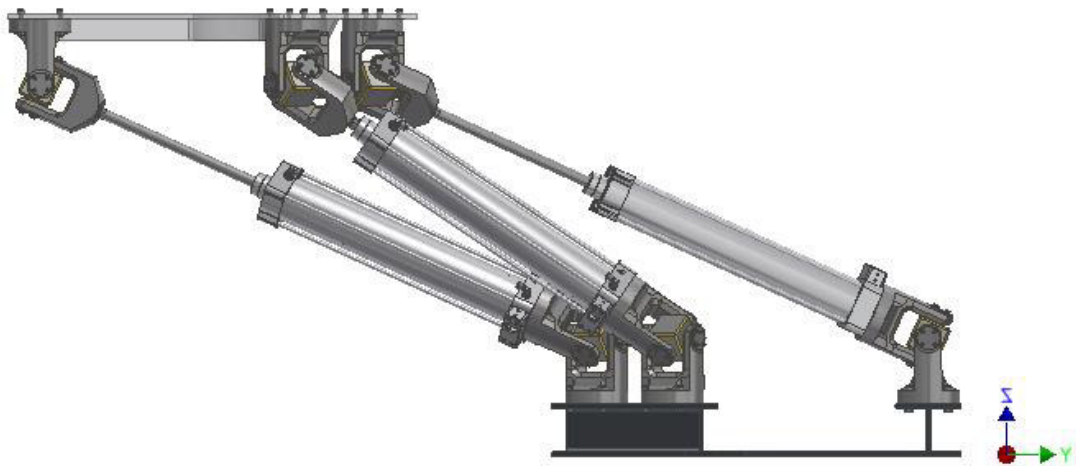


Figura 3.37. Posición límite negativa de la plataforma en el plano YZ

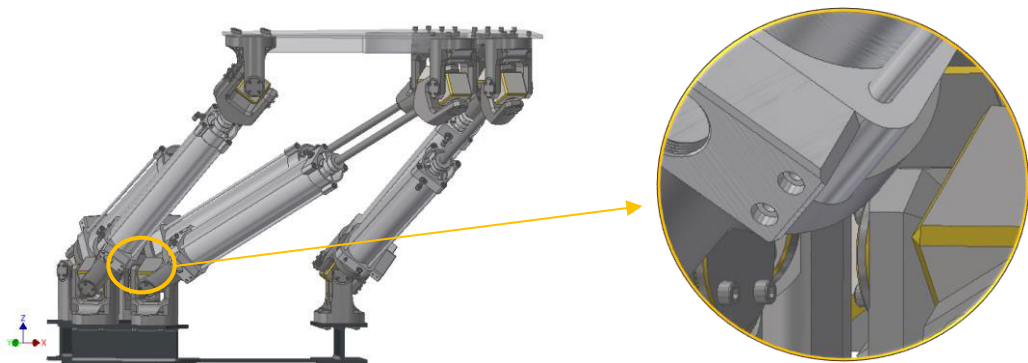


Figura 3.38. Punto de contacto de los actuadores en la posición límite negativa en el plano YZ

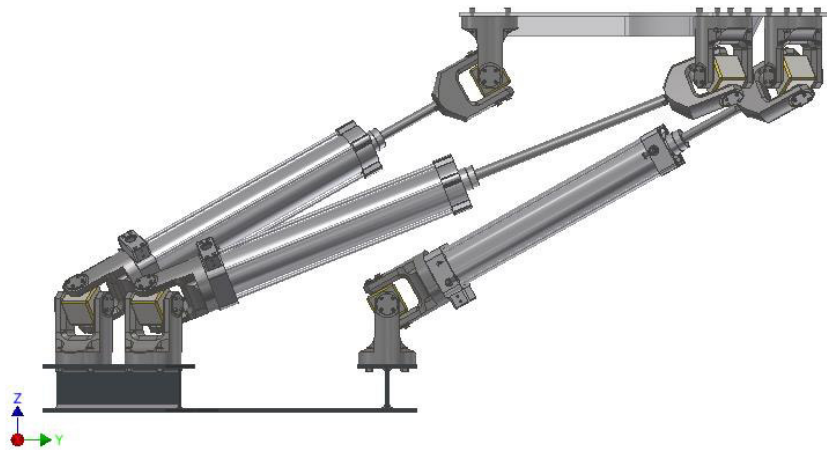


Figura 3.39. Posición límite positiva de la plataforma en el plano YZ

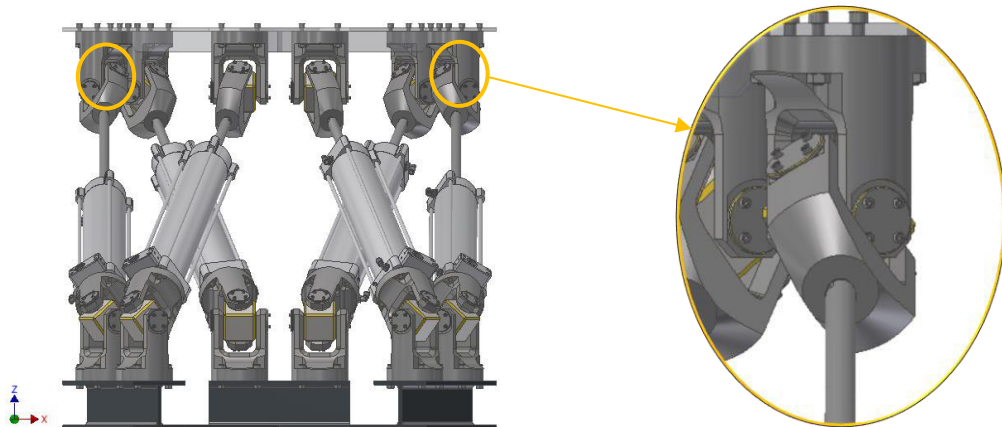


Figura 3.40. Punto de contacto de los actuadores en la posición límite positiva en el plano YZ

3.3.3.2. Puntos límite en el plano XZ

Ocurre lo mismo que en el plano YZ, existen dos puntos máximos, uno positivo y otro negativo, pero en este caso, ambos tienen el mismo valor absoluto, ya que la simetría respecto al plano YZ, que es la dirección del eje X, es completa.

Tabla 3.18. Posiciones límite de la plataforma en el plano XZ

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Sentido positivo	1194.82	0	534.66
Sentido negativo	-1194.82	0	534.66

Tabla 3. 19. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones límite del plano XZ

	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)
Sentido positivo	500	70.05	302.41	500	70.05	302.41
Sentido negativo	70.05	500	302.41	70.05	500	302.41

Se cumple la condición de punto límite, con al menos dos cilindros estirados al completo en cada posición límite.

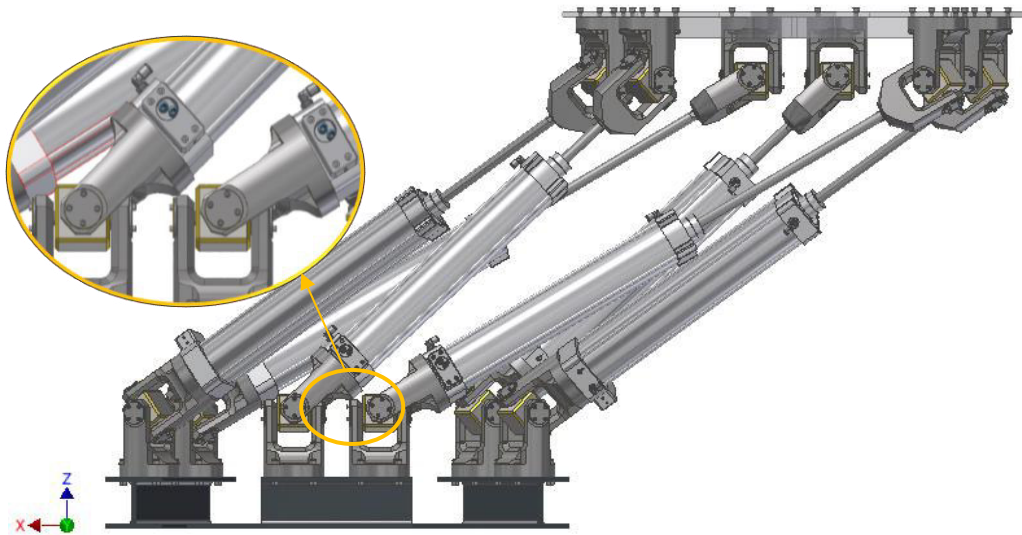


Figura 3.41. Punto de contacto en la posición límite negativa de la plataforma en el plano XZ

En este caso no es necesario analizar la posición positiva también , ya que se llega al mismo resultado pero con una configuración completamente análoga, con el punto de contacto entre las juntas de la base de las piernas D1 y D2.

3.3.3.3. Puntos adicionales

Analizando los puntos anteriores, se observa que, si se pasa directamente de un punto límite en X al punto límite de Y en sentido negativo, siempre existen dos actuadores estirados al máximo, por tanto, durante esa trayectoria, todos los puntos alcanzados son máximos, pero no ocurre lo mismo si el desplazamiento se realiza hacia el punto límite Y positivo, en todo el desplazamiento no existe ningún actuador estirado, por lo tanto, ha de existir otros puntos máximos en posiciones con coordenadas Y positivas y X no nulas.

Estos puntos máximos teóricos, cuando Z es igual a 0 mm, se sitúan en las coordenadas X=1194.82 mm, Y=689.1 mm, y en X=-1194.82 mm, Y=689.1 mm, aunque ya se ha demostrado que, físicamente, no es posible alcanzar ese punto.

El punto máximo alcanzable debe de estar situado en el plano formado por el eje Z y el punto máximo teórico. Para hallarlo se emplea el mismo proceso que en los casos anteriores, encontrar el punto de contacto con inventar.

En concreto, este plano tiene un ángulo de 30 grados con respecto al plano XZ, esto no es un resultado aleatorio, sino que se debe a la configuración y simetría del robot.

Estos puntos se sitúan en:

Tabla 3.20. Posiciones límite de los puntos adicionales

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Sentido positivo	1070.82	618.71	642.02
Sentido negativo	-1070.82	618.71	642.02

Tabla 3.21. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones límite de los puntos adicionales

	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)
Sentido positivo	500	121.9	500	500	121.9	500
Sentido negativo	121.9	500	500	121.9	500	500

En todo momento hay mínimo dos actuadores completamente estirados por tanto se trata de puntos límite, y con esto, ya están definidos todos los puntos máximos de desplazamiento en los ejes X e Y.

La zona de contacto en estos puntos, ocurre entre las juntas inferiores de las piernas D1 y D2, al igual que sucede en el desplazamiento simple en X.

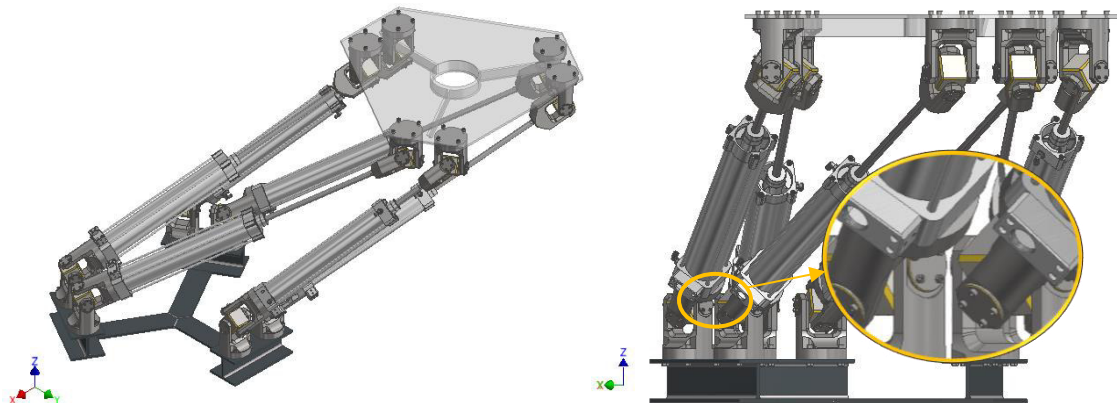


Figura 3.42. Zona de contacto en la posición negativa de los puntos adicionales

3.3.3.4. *Altura máxima y mínima*

En este caso solo se determina la altura teórica a la que llega la plataforma móvil del robot con todas las piernas estiradas, y la altura con todas ellas encogidas.

Tabla 3.22. Posiciones máxima y mínima de la plataforma en el eje Z

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Altura máxima	0	0	1510.3
Altura mínima	0	0	998.01

Tabla 3.23. Longitud de carrera de los actuadores en las posiciones máxima y mínima de la plataforma móvil en el eje Z

	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	D5 (mm)	D6 (mm)
Altura máxima	500	500	500	500	500	500
Altura mínima	0	0	0	0	0	0

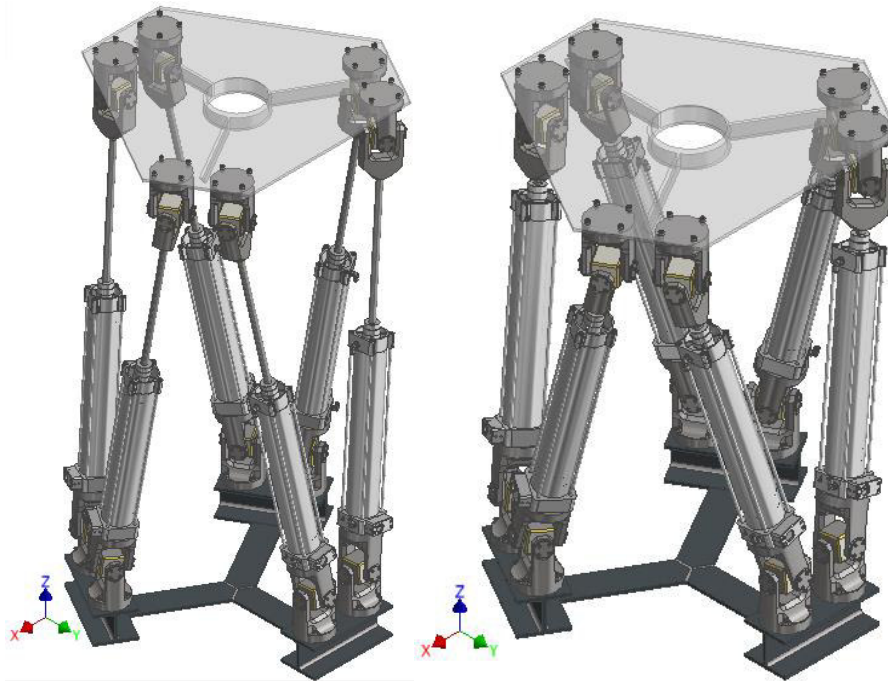


Figura 3.43. Altura máxima y mínima de la plataforma móvil en el eje Z

3.3.3.5. Superficie de trabajo en el plano YZ

Una vez hallados todos los puntos máximos, es posible graficar el área de trabajo máximo del robot, en cada uno de los planos, mediante los complementos CAE de Inventor.

Para este apartado, ya se generan simulaciones de posiciones secuenciales, haciendo que la plataforma se desplace de un punto límite a otro, siempre cumpliendo con la condición de que dos actuadores estén estirados al completo.

Debido al gran número de secuencias que hay que realizar y a la semejanza de longitudes entre actuadores en determinados movimientos, se crean curvas de posiciones secuenciales que pueden guardarse y cargarse en cualquier actuador.

Todos los tránsitos entre puntos límite se configuran para realizarse en un período de 2 segundos, para así evitar velocidades y aceleraciones demasiado grandes.

Otro aspecto importante para seleccionar un tiempo contante es, asegurar que todos los actuadores aumentan y disminuyen en la misma proporción y llegan a la longitud requerida en el punto límite al mismo tiempo, de no ser así, tendrían lugar giros y desplazamientos no deseados.

El objetivo de las simulaciones es ser capaz de analizar los datos obtenidos para comprobar el correcto diseño y funcionamiento y, para poder observar la trayectoria de la plataforma y las coordenadas por las que pasa la misma, se inserta un trazo en el centro de la parte superior de la plataforma móvil, lugar en el cuál se sitúa su centro de coordenadas, punto en función del cuál se han realizado los cálculos previos.

Para hallar la superficie máxima de trabajo máximo en el plano YZ se emplean los puntos máximo y mínimo de los ejes Y y Z, quedando un tránsito entre puntos y actuadores así.

Tabla 3.24. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano YZ (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
X	0	0	0	0	0
Y	0	1225.07	0	-1340.94	0
Z	998.01	329.03	1510.3	339.34	998.01

Tabla 3.25. Secuencia de valores de los actuadores para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano YZ (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
D1	0	126.16	500	500	0
D2	0	126.16	500	500	0
D3	0	500	500	84.37	0
D4	0	126.16	500	500	0
D5	0	126.16	500	500	0
D6	0	500	500	84.37	0

La creación de una secuencia posicional en Inventor genera un gráfico de posiciones en función del tiempo, en el cuál se observan una serie de puntos azules, que representan la longitud del actuador en cada punto límite de la secuencia, y un trazo rojo, que indica las longitudes por las que pasa el par para llegar a dichas posiciones.

Puede observarse en todas las gráficas de longitudes secuenciales que el valor siempre es 42,5 mm mayor del mostrado en las tablas, esto se debe a que el valor que muestra la gráfica es el corregido para introducir a la simulación y el de la tabla es el valor real.

Para esta trayectoria se crean dos curvas secuenciales, una para los actuadores D1,D2,D4 y D5 y otra para D3 y D6, ya que realizan los mismos cambios longitudinales (Gráfico 3.1 y 3.2) respectivamente.

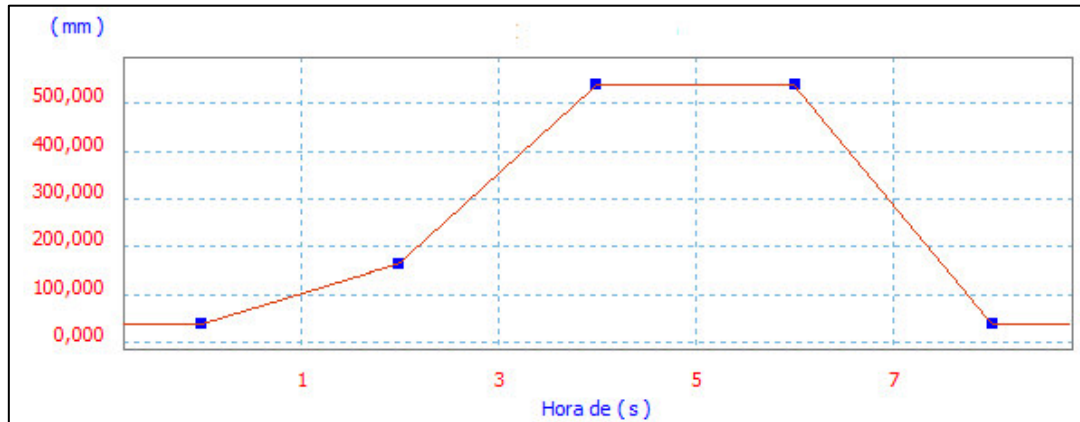


Gráfico 3.1. Secuencia de longitud de los actuadores D1-D2-D4-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano YZ

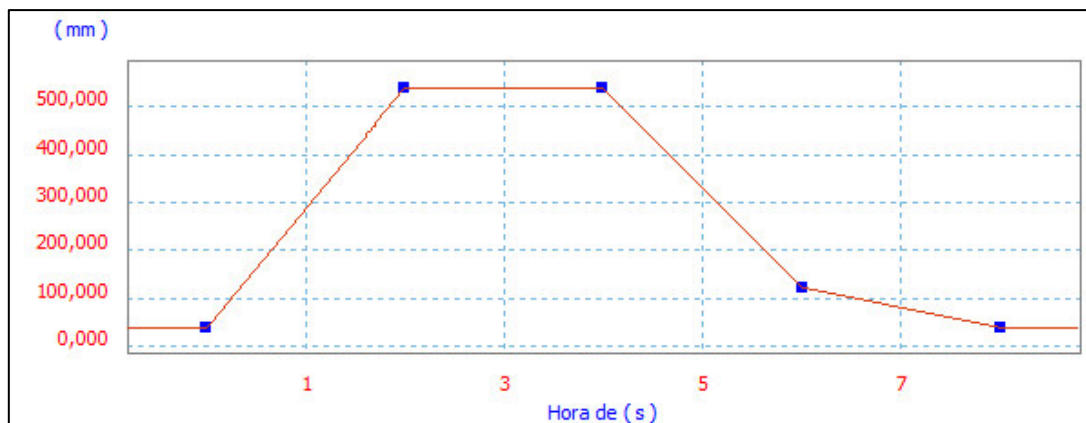


Gráfico 3. 2. Secuencia de longitud de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano YZ

Una vez terminada la simulación, los datos se exportan a un archivo Excel, donde se tratan y se comparan con los datos de inicio para deducir si la configuración y el funcionamiento del robot son correctos.

En la gráfica 3.3. se resaltan los datos de los puntos máximos y mínimos, los cuales se comparan con los teóricos en la tabla 3.26, los datos obtenidos son:

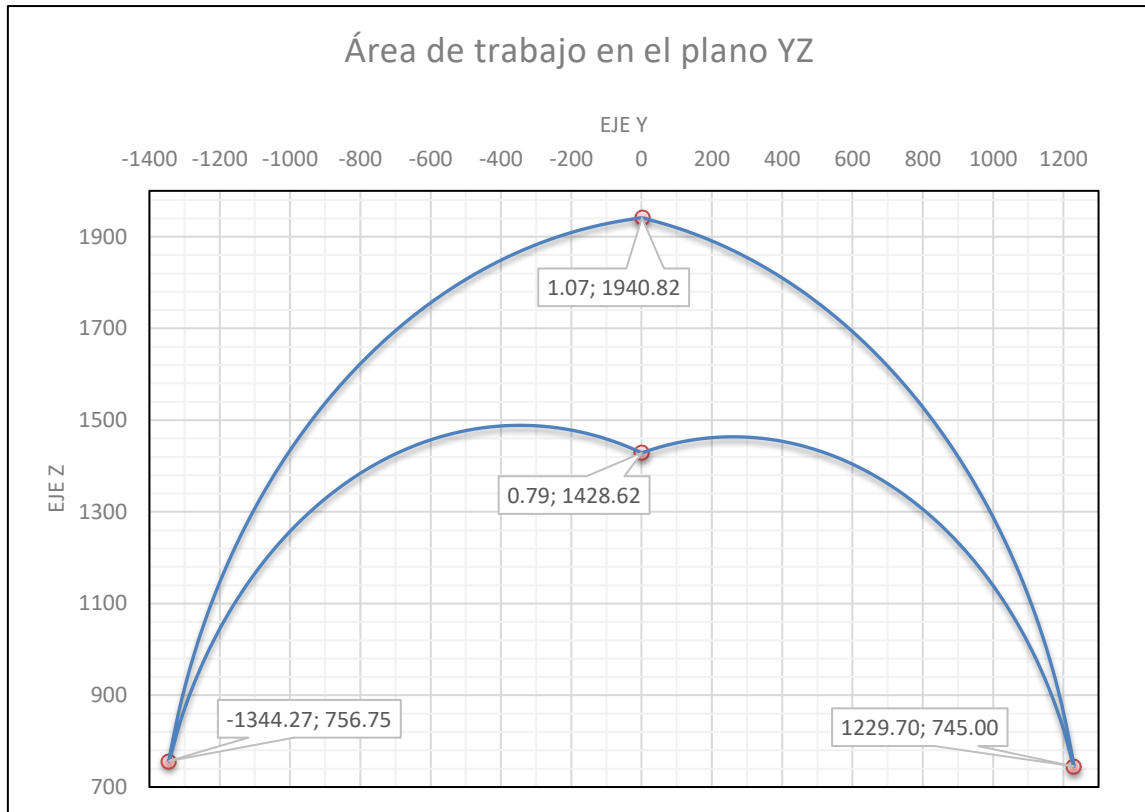


Gráfico 3.3. Superficie de trabajo en el plano YZ

Es necesario resaltar, que los datos obtenidos de las coordenadas Z son valores reales de la distancia entre las bases del robot, debido a la colocación previa del trazo, mientras que las coordenadas teóricas del eje Z son definidas por la estructura alámbrica descrita en el punto 3.2.1. "Cálculos posicionales", por lo tanto es necesario corregir los datos de la simulación, restando las distancias existentes entre la estructura alámbrica y la cara inferior de la base fija, ya que en ella se sitúa el punto (0,0,0) para la toma de datos y la distancia entre la estructura alámbrica y la cara superior de la base móvil, lugar donde se ha situado la toma de datos, al valor mostrado en el análisis de la simulación, en total, se ha de restar un valor igual a 430 mm al dato ofrecido por inventor en el eje Z.

Tabla 3.26. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano YZ

		Simulada (mm)	Simulada corregida (mm)	Teórica (mm)	Error
Posición 1	X	0.33		0	0.33
	Y	0.79		0	0.79
	Z	1428.62	998.62	998.01	0.61
Posición 2	X	-3.66		0	-3.66
	Y	1229.70		1225.07	4.63
	Z	745	315	329.03	-14.03
Posición 3	X	0.3			0.3
	Y	1.07		0	1.07
	Z	1940.82	1510.82	1510.3	0.52
Posición 4	X	-0.65		0	-0.65
	Y	-1344.27		-1340.94	-3.33
	Z	756.75	326.75	339.34	-12.59

En la tabla 3.26. se muestran los errores posicionales en los puntos límite, de los que se puede deducir que el posicionamiento en X es bastante próximo al dato teórico en todos los puntos, pero las coordenadas Y y Z, en las posiciones 2 y 4, que corresponden a las posiciones límite del eje Y, tienen un error considerable, por lo tanto lo más adecuado es ajustar la posición de estos puntos.

De los datos de la tabla 3.26. se obtienen los errores medios en cada uno de los ejes para, posteriormente, obtener el error del robot en el espacio.

Tabla 3.27. Error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano YZ

	X	Y	Z
Error medio	-0.92	0.79	-6.37

3.3.3.6. Superficie de trabajo en el plano XZ

La obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ se ejecuta de manera similar al realizado para el plano anterior, generando una simulación de trayectoria por los puntos máximos de los ejes X y Z, y obteniendo, tratando y comparando los datos obtenidos. Los puntos de esta simulación son:

Tabla 3.28. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano XZ (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
X	0	1194.82	0	-1194.82	0
Y	0	0	0	0	0
Z	998.01	534.66	1510.3	534.66	998.01

Tabla 3. 29. Secuencia de valores de los actuadores para obtener la superficie máxima de trabajo en el plano XZ (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
D1	0	500	500	70.05	0
D2	0	70.05	500	500	0
D3	0	344.91	500	344.91	0
D4	0	500	500	70.05	0
D5	0	70.05	500	500	0
D6	0	344.91	500	344.91	0

Para esta trayectoria en la que D1=D4, D2=D5 y D3=D6, se generan y guardan tres curvas secuenciales que presentan esta disposición:

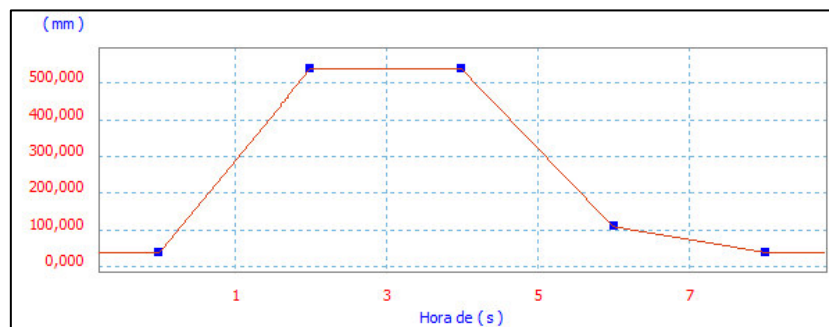


Gráfico 3.4. Secuencia de longitudes de los actuadores D1-D4 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ

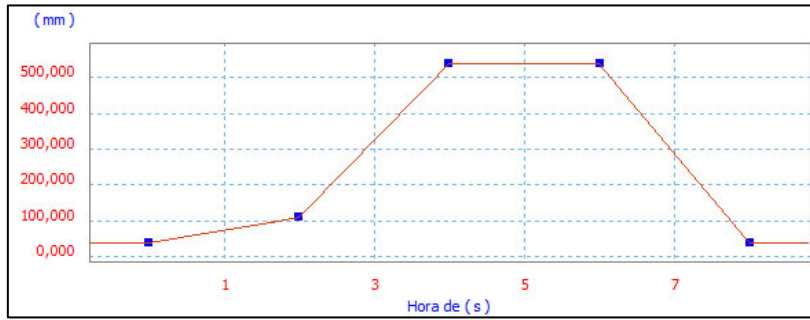


Gráfico 3.5. Secuencia de longitudes de los actuadores D2-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ

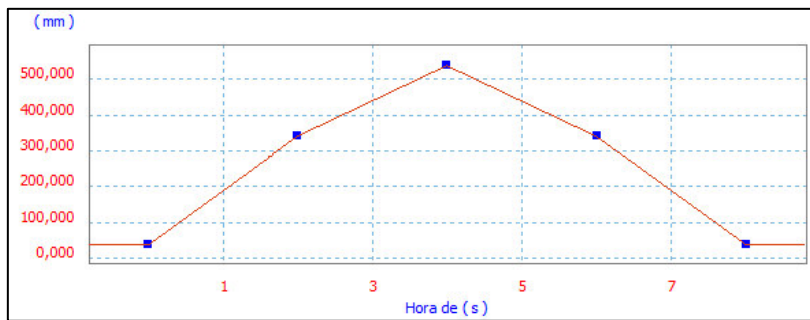


Gráfico 3.6. Secuencia de longitudes de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XZ

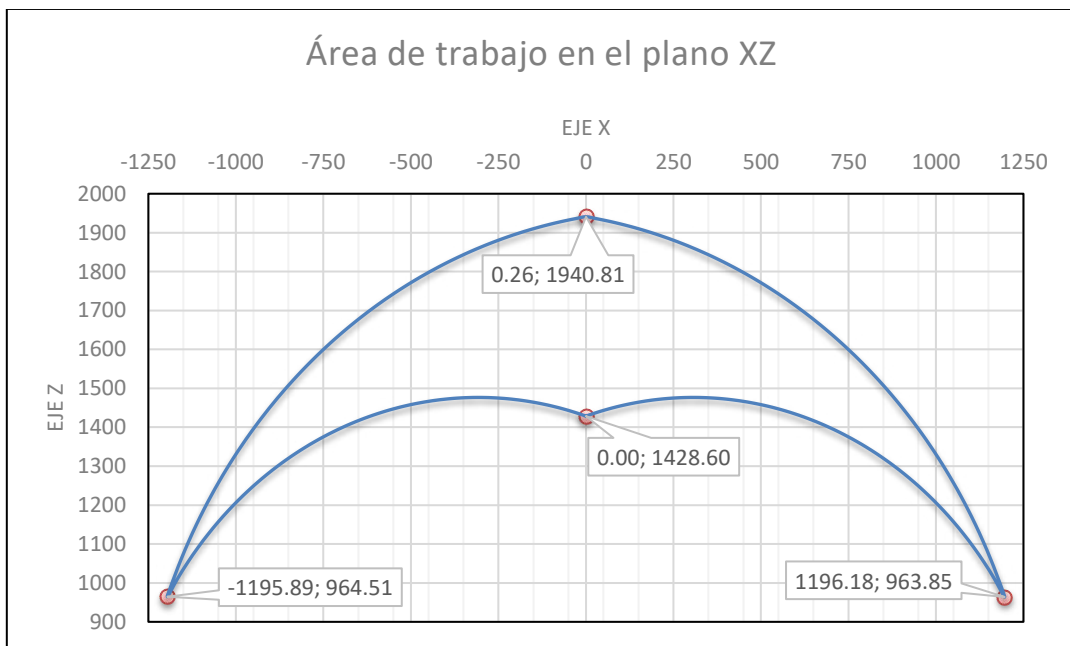


Gráfico 3.7. Superficie de trabajo en el plano YZ

Mediante la tabla de comparación y la corrección de los valores simulados se obtiene:

Tabla 3.30. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XZ

		Simulada (mm)	Simulada corregida (mm)	Teórica (mm)	Error absoluto (mm)
Posición 1	X	0		0	0
	Y	1.02		0	1.02
	Z	1428.6	998.6	998.01	0.59
Posición 2	X	1196.18		1194.82	1.36
	Y	7.37		0	7.37
	Z	963.85	533.85	534.66	-0.81
Posición 3	X	0.26		0	0.26
	Y	1.03		0	1.03
	Z	1940.81	1510.81	1510.3	0.51
Posición 4	X	-1995.89		-1194.82	-1.07
	Y	-3.68		0	-3.68
	Z	964.51	534.51	534.66	-0.15

En esta simulación de trayectoria, los errores existentes en cualquiera de las posiciones son más reducidos, por lo tanto, puede tomarse como una simulación correcta, de la cuál se obtiene un error medio:

Tabla 3.31. Error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XZ

	X	Y	Z
Error medio	0.14	1.44	0.04

3.3.3.7. Superficie de trabajo de los puntos adicionales

Al igual que en los casos anteriores, se genera una secuencia de paso por los puntos límite adicionales y por las posiciones máxima y mínima de Z.

Tabla 3.32. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en los planos de puntos adicionales (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
X	0	1070.82	0	-1070.82	0
Y	0	618.71	0	618.71	0
Z	998.01	642.02	1510.3	642.02	998.01

Tabla 3.33. Secuencia de valores de los actuadores para hallar la superficie máxima de trabajo en los planos de puntos adicionales (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5
D1	0	500	500	121.9	0
D2	0	121.9	500	500	0
D3	0	500	500	500	0
D4	0	500	500	121.9	0
D5	0	121.9	500	500	0
D6	0	500	500	500	0

Para este movimiento, se crean tres curvas secuenciales, debido a que, igual que para el plano XZ, $D1=D4$, $D2=D5$ y $D3=D6$.

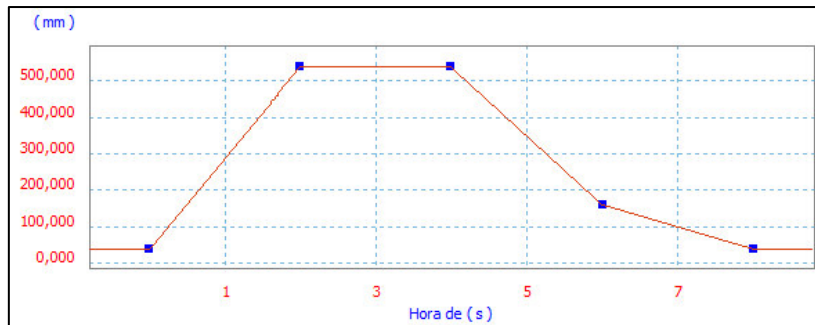


Gráfico 3.8. Secuencia de longitudes de los actuadores D1-D4 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el del plano de puntos adicionales

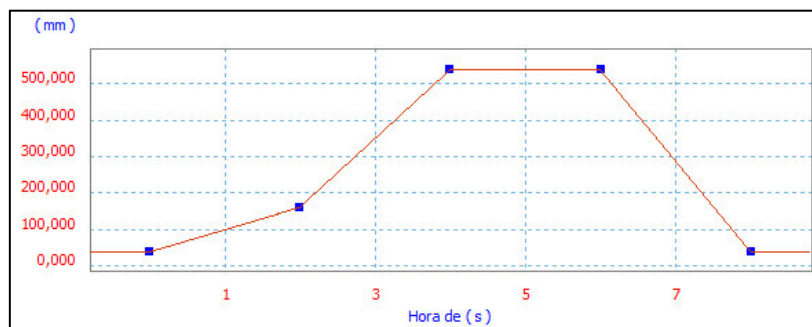


Gráfico 3.9. Secuencia de longitudes de los actuadores D2-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el del plano de puntos adicionales

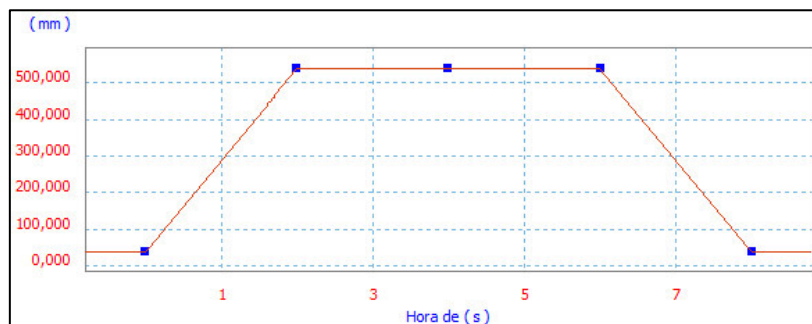


Gráfico 3.10. Secuencia de longitudes de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el del plano de puntos adicionales

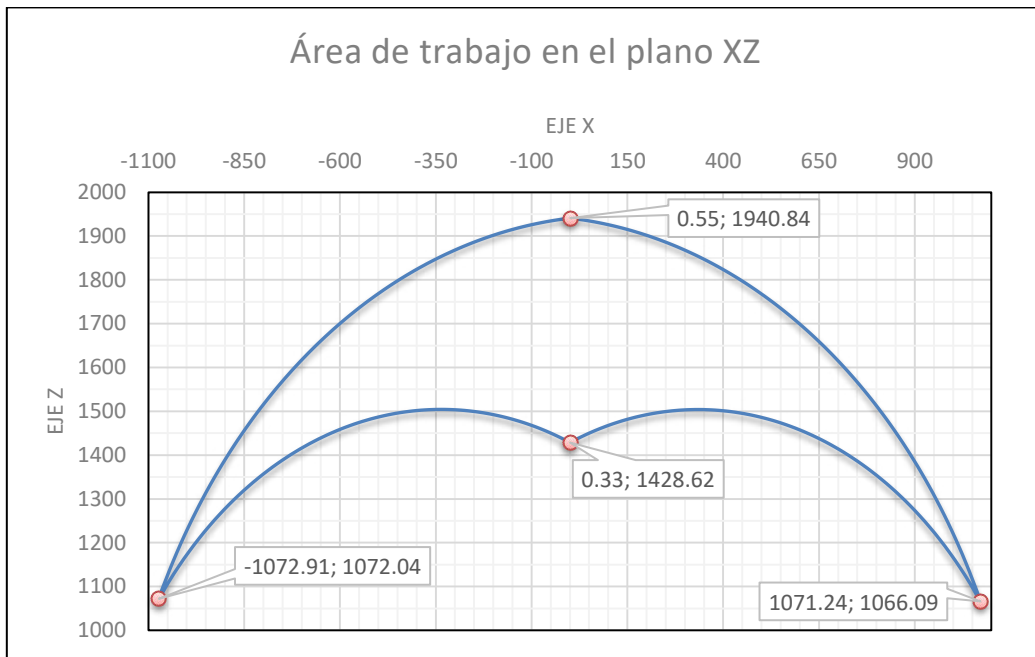


Gráfico 3.11. Superficie de trabajo en el plano XZ de los puntos adicionales

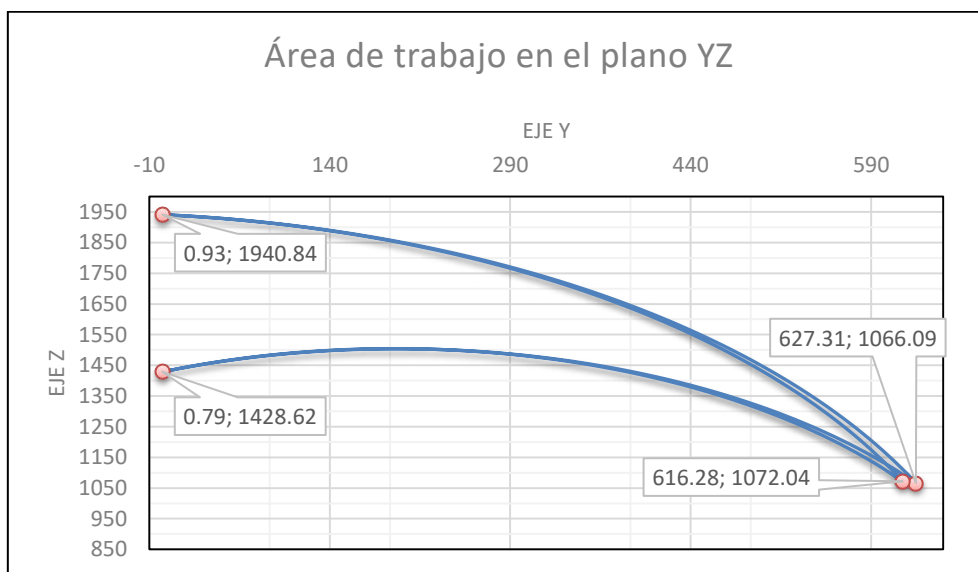


Gráfico 3.12. superficie de trabajo en el plano YZ de los puntos adicionales

Tabla 3.34. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo máxima en los planos de puntos adicionales

		Simulada (mm)	Simulada corregida (mm)	Teórica (mm)	Error absoluto (mm)
Posición 1	X	0.33		0	0.33
	Y	0.79		0	0.79
	Z	1428.62	998.62	998.01	0.61
Posición 2	X	1071.24		1070.82	0.42
	Y	627.31		618.71	8.6
	Z	1066.09	636.09	642.02	-5.93
Posición 3	X	0.55		0	0.55
	Y	0.93		0	0.93
	Z	1940.84	1510.84	1510.3	0.54
Posición 4	X	-1072.91		-1070.82	-2.09
	Y	616.28		618.71	-2.43
	Z	1072.04	642.04	642.02	0.02

Los datos obtenidos son bastante fieles a los teóricos, por lo tanto, también puede suponerse que es correcta, aunque siempre puede ajustarse.

Tabla 3.35. Error medio en la obtención de la superficie de trabajo máxima en los planos de puntos adicionales

	X	Y	Z
Error medio	-0.2	1.97	-1.19

3.3.3.8. Superficie de trabajo en el plano XY

En este movimiento, la plataforma sufre desplazamientos significativos en los 3 ejes cartesianos, pero sólo se representa el plano XY, ya que es el plano más interesante y el único que proyecta una imagen diferenciable del movimiento real de la plataforma.

Tabla 3.36. Secuencia de puntos para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano XY (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6	Posición 7
X	0	1070.82	1194.82	0	-1194.82	-1070.82	0
Y	1225.07	618.71	0	-1340.94	0	618.71	1225.07
Z	329.03	642.02	534.66	339.34	534.66	642.02	329.03

Tabla 3.37. Secuencia de valores de los actuadores para hallar la superficie máxima de trabajo en el plano XY (mm)

	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6	Posición 7
D1	126.16	500	500	500	70.05	121.9	126.16
D2	126.16	121.9	70.05	500	500	500	126.16
D3	500	500	344.91	84.37	344.91	500	500
D4	126.16	500	500	500	70.05	121.9	126.16
D5	126.16	121.9	70.05	500	500	500	126.16
D6	500	500	500	84.37	344.91	500	500

Según los datos de la tabla 3.37. es necesario crear 3 curvas secuenciales, del mismo modo que en los dos apartados anteriores.

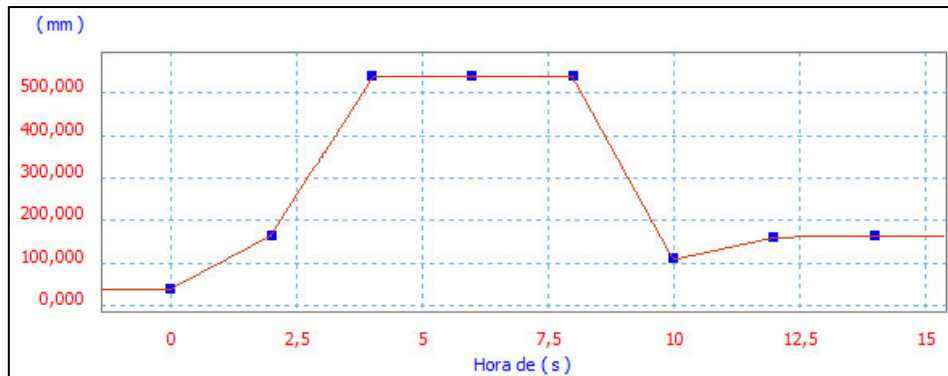


Gráfico 3.13. Secuencia de longitudes de los actuadores D1-D4 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XY

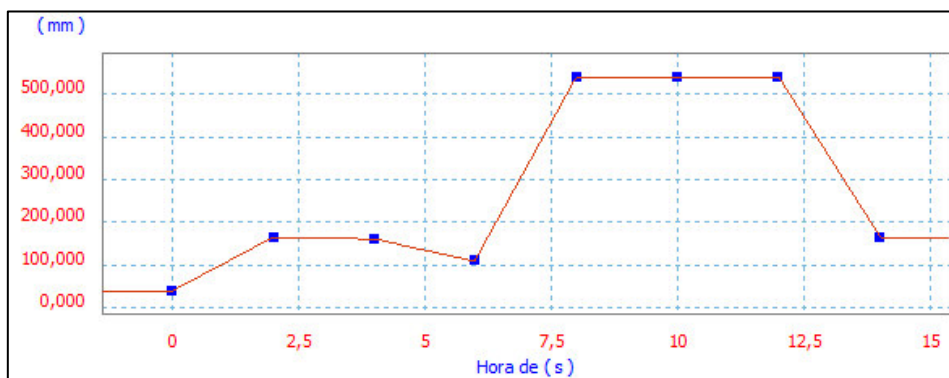


Gráfico 3.14. Secuencia de longitudes de los actuadores D2-D5 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XY

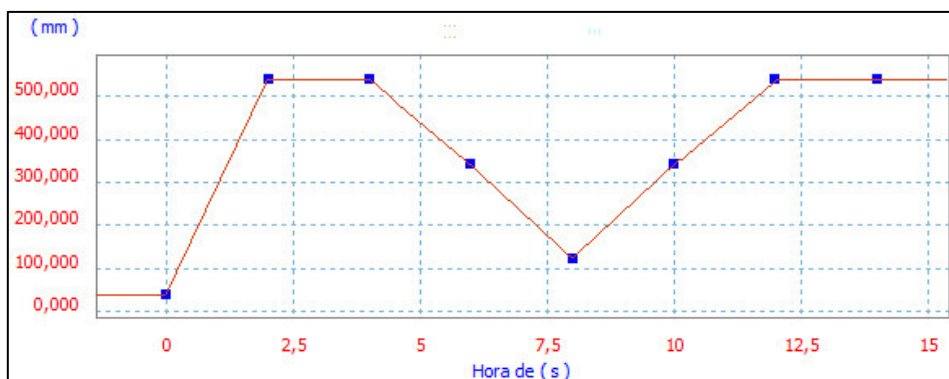


Gráfico 3.15. Secuencia de longitudes de los actuadores D3-D6 en el movimiento de obtención de la superficie de trabajo en el plano XY

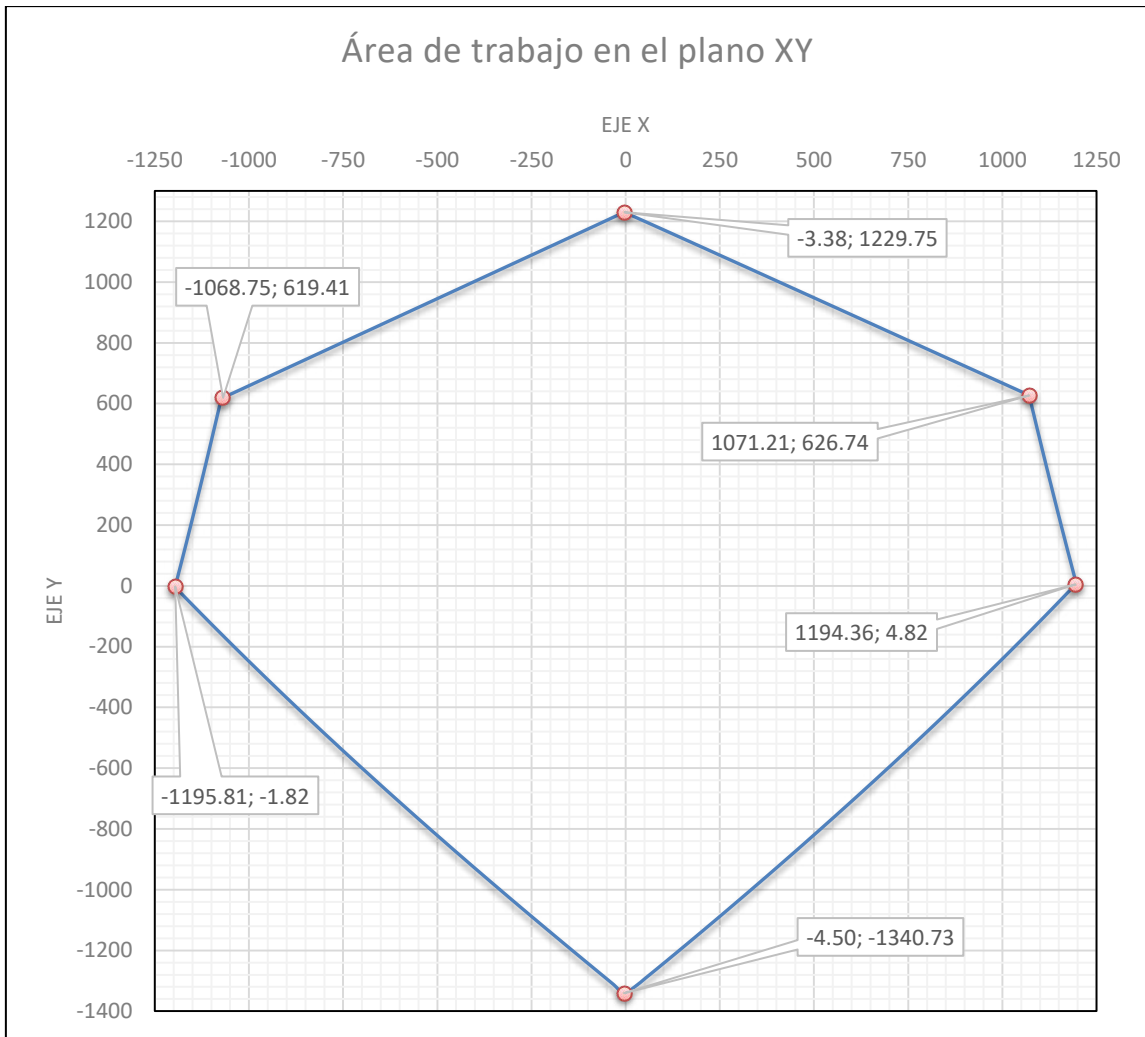


Gráfico 3.16. Superficie de trabajo en el plano XY

En el gráfico 3.16. se observa como la plataforma realiza una trayectoria hexagonal irregular en el plano XY, resultado derivado de las dimensiones y configuración hexagonal de las bases y su colocación en sentido inverso una sobre la otra.

Según los resultados teóricos, en la trayectoria de desplazamiento entre los puntos máximos del eje X y los puntos adicionales, la coordenada X se mantendría en su coordenada máxima, generando en el gráfico una trayectoria perpendicular al eje X, pero debido a la estructura del robot, esos puntos son físicamente inalcanzables.

Tabla 3.38. Comparación de coordenadas teóricas y simuladas en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XY

		Simulada (mm)	Simulada corregida (mm)	Teórica (mm)	Error absoluto (mm)
Posición 1	X	-3.38		0	-3.38
	Y	1229.75		1225.07	4.68
	Z	746.11	316.11	329.03	-12.92
Posición 2	X	1071.21		1070.82	0.39
	Y	626.74		618.71	8.03
	Z	1066.18	636.18	642.02	-5.84
Posición 3	X	1194.36		1194.82	-0.46
	Y	4.82		0	4.82
	Z	968.22	538.22	534.66	3.56
Posición 4	X	-4.5		0	-4.5
	Y	-1340.73		-1340.94	0.21
	Z	768.85	338.85	339.34	-0.49
Posición 5	X	-1195.81		-1194.82	-0.99
	Y	-1.82		0	-1.82
	Z	965.23	535.23	534.66	0.57
Posición 6	X	-1068.75		-1070.82	2.07
	Y	619.41		618.71	0.7
	Z	1075.49	645.49	642.02	3.47

En esta trayectoria, en la que se pasa por todos los puntos límite de los tres análisis anteriores, se observa como prácticamente los valores se mantienen constantes, excepto en la posición 4, que representa el punto límite en el eje Y negativo, presentando valores más parejos a los teóricos que los del primer análisis, por lo tanto, puede concluirse que el error hallado en la simulación de trayectoria del plano YZ en esa posición es debido a una toma de datos errónea por parte de Inventor y se puede despreciar.

Tabla 3.39. Error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano XY

	X	Y	Z
Error medio	-1.15	2.77	-1.94

Tabla 3.40. Corrección del error medio en el movimiento de obtención de la superficie máxima de trabajo en el plano YZ

	X	Y	Z
Error medio	-1.01	2.16	-4.3

De todos los errores medios obtenidos en las simulaciones se obtiene el error medio general.

Tabla 3.41. Error medio en el espacio de todos los movimientos en puntos límite

	X	Y	Z
Error medio general	-0.5	1.39	-1.85

De estas tres coordenadas de error, se obtiene el módulo del error medio general en todos los movimientos realizados por la plataforma.

$$Error\ medio = \sqrt{Error\ X^2 + Error\ Y^2 + Error\ Z^2} \quad (3.1)$$

Dando como resultado, un error medio en el espacio de trabajo de 2.37 mm, un error asumible si se tiene en cuenta que en el espacio de trabajo, el robot puede desplazarse:

- En el eje X, entre valores máximos de 1194.82 mm y -1194.82 mm, presentando una amplitud de 2389.64 mm.
- En el eje Y, entre valores máximos de 1225.07 mm y -1340.94, con una amplitud de 2566.01 mm.
- En el eje Z, entre valores máximos de 1510.3 y 329.03, con una amplitud de movimiento de 1181.27 mm.

De estos resultados puede considerarse un error aceptable, ya que su dimensión es ínfima comparada con los desplazamientos que puede recorrer, aun así, pueden realizarse numerosos ajustes para mejorar la precisión, ya que es cierto que algunos puntos singulares si presentan errores mayores.

3.3.3.9. Volumen de trabajo

Mediante la superposición de todos los movimientos realizados antes, se obtienen las trayectorias que delimitan el espacio máximo y mínimo al cuál puede acceder el robot.

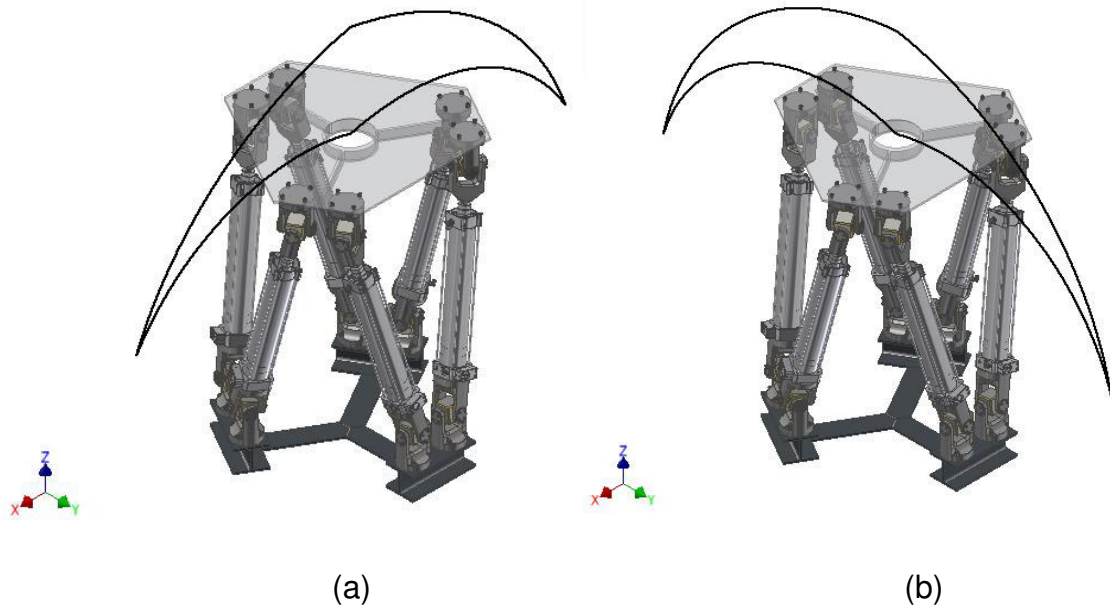


Figura 3.44. Trayectorias de desplazamiento del robot en el plano XZ (a) y en el plano YZ (b)

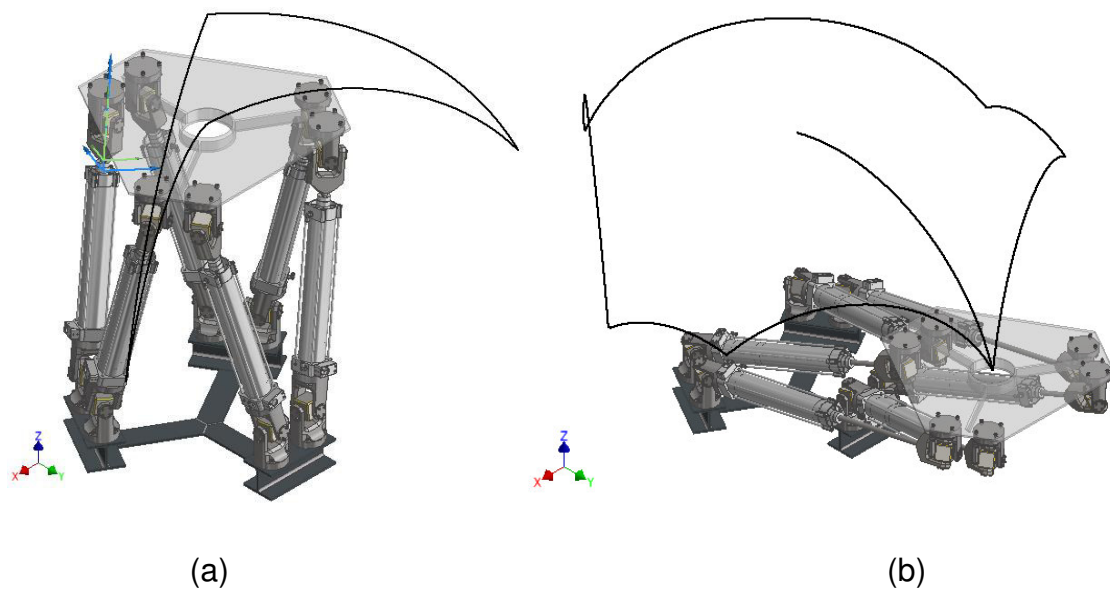


Figura 3.45. Trayectorias de desplazamiento del robot en el plano de puntos adicionales (a) y en el plano XY (b)

Superponiendo todas estas trayectorias, se forma la trayectoria general de desplazamiento máximo, dentro de la cual se encuentran todos los puntos alcanzables por el robot

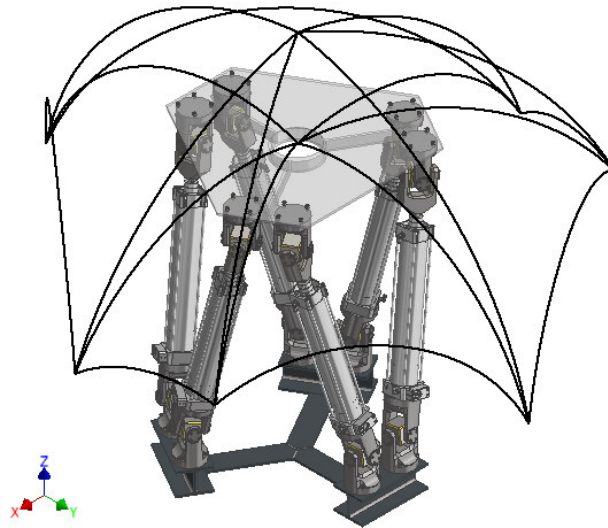


Figura 3.46. Trayectoria de desplazamiento completo a través de todos los puntos máximos alcanzables por el robot en el espacio

De esta trayectoria completa, se obtienen y exportan los datos del mismo modo que anteriormente, para así, generar un nuevo archivo en inventor que muestre la superficie que limita todo el espacio de trabajo del robot.

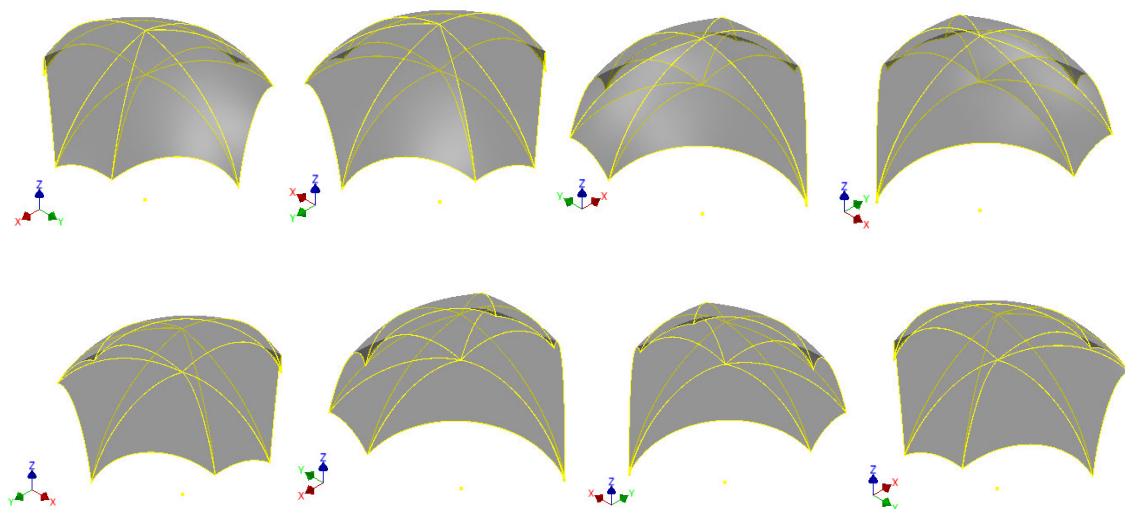


Figura 3.47. Vistas isométricas del espacio de trabajo

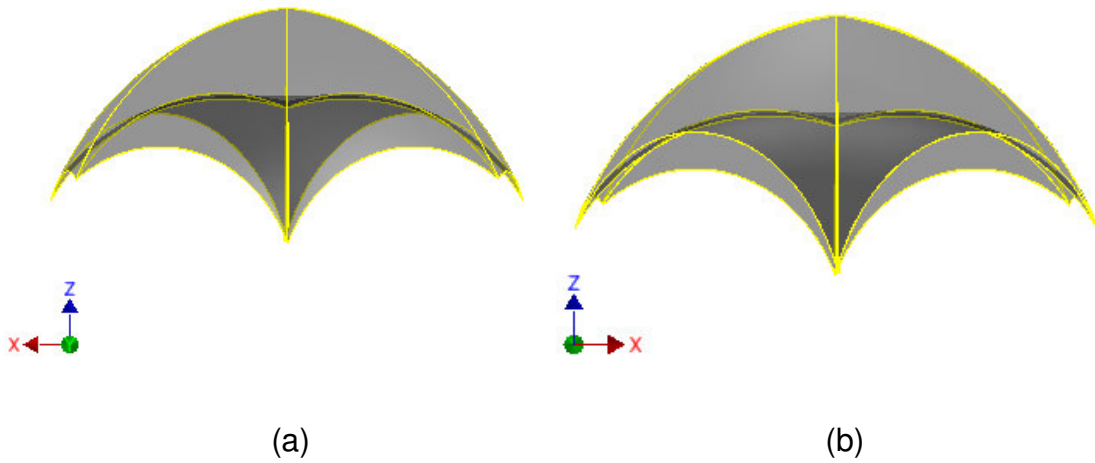


Figura 3.48. Vistas frontal (a) y posterior (b) del espacio de trabajo

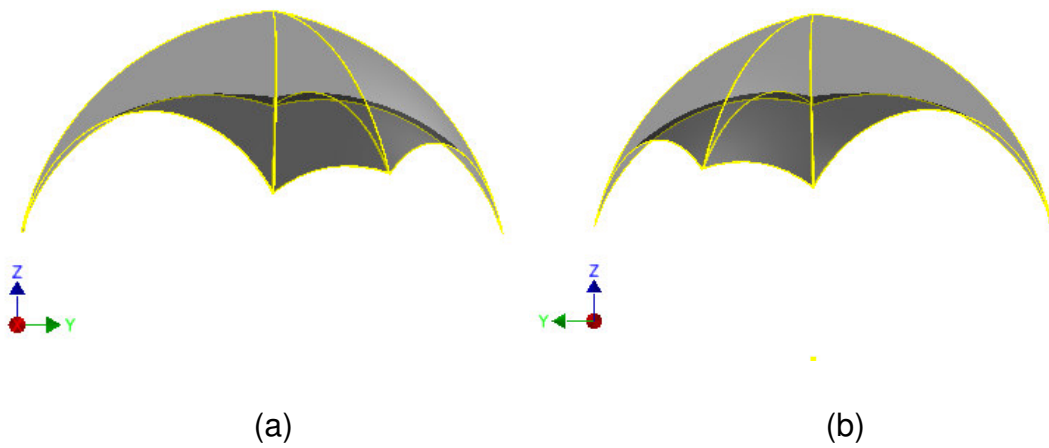


Figura 3.49. Vistas derecha (a) e izquierda (b) del espacio de trabajo

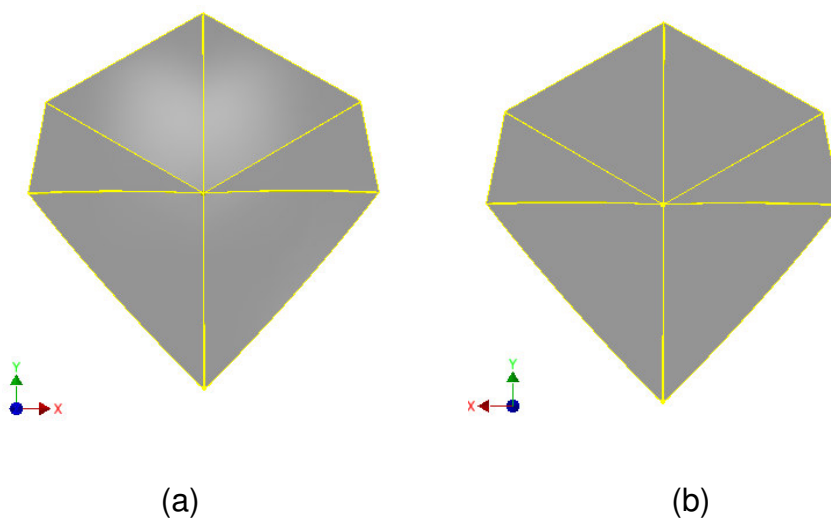


Figura 3.50. Vistas superior (a) e inferior (b) del espacio de trabajo

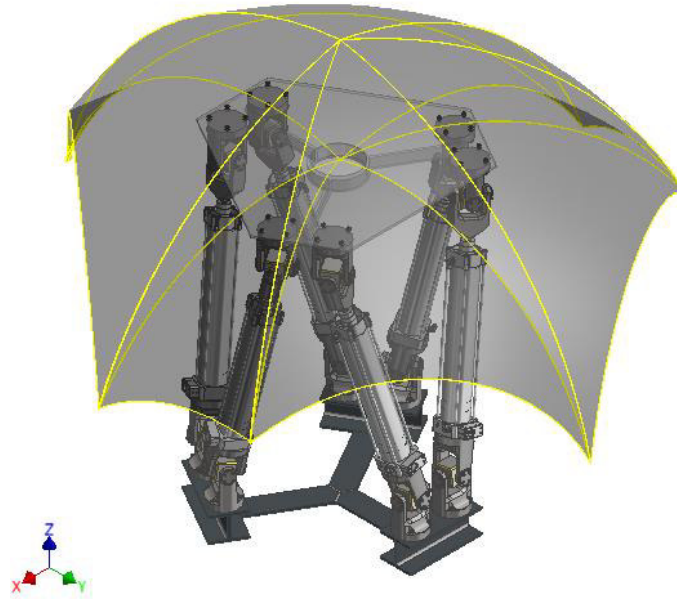


Figura 3.51. Plataforma Stewart-Gough con representación del espacio de trabajo

3.3.4. Rotación máxima

El estudio de la rotación máxima en cada eje, dentro de todo el espacio de trabajo es una tarea muy compleja, por ello, el estudio de rotación se realiza sin desplazamientos en los ejes X e Y, pero situando la plataforma a la altura más favorable para garantizar un giro máximo.

La posición mas favorable para llegar a los ángulos de giro límite es la que sitúa todos los actuadores en la posición media (250 mm), ya que partiendo de este punto se permite el máximo encogimiento en unos actuadores y el mínimo en otros.

La posición que cumple esto es la situada en las coordenadas (0,0,1255.39 mm), posición de la que se parte para calcular los tres giros.

Según los resultados del apartado 3.2.2. “Simulación posicional”, las posiciones límite de giro se alcanzan en condiciones distintas para cada eje, en el giro respecto al eje X (Ψ), la posición límite se alcanza cuando dos actuadores se encogen por completo, para el giro en Y (θ), se llega al giro máximo en cuanto un solo actuador se estira o encoge totalmente, y para el eje Z (α), es necesario que tres actuadores lleguen a su longitud extrema, sea máxima o mínima, todo esto, está explicado y referenciado en la tabla 3.15.

3.3.4.1. Rotación máxima respecto al eje X (Ψ)

El giro máximo se adopta cuando los actuadores D4 y D5 llegan a su punto mínimo, podría aumentarse el valor del ángulo de giro llevando a los actuadores D1 y D2 a su longitud máxima, pero esto desplazaría la plataforma en el eje Y, por lo tanto no es una solución válida para este estudio.

Tabla 3.42. Posición y orientación de giro máximo en el eje X (Ψ)

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255.39	33.94	0	0

Tabla 3.43. Longitud de actuadores en la posición y orientación de giro máximo en el eje X (Ψ)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1460.67	1460.67	1355.37	1035.03	1035.03	1355.37
Recorrido del actuador (mm)	427.67	427.67	320.37	0.03	0.03	320.37

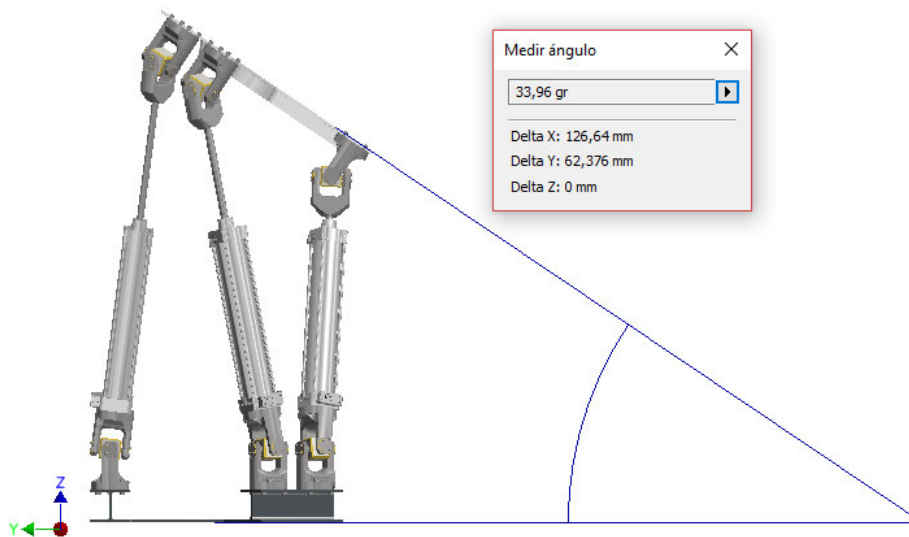


Figura 3.52. Ángulo de giro máximo respecto al eje X (Ψ)

Mediante la herramienta de Inventor de medición, se comprueba que la configuración de actuadores es la idónea para situar la plataforma en dicha posición, el resultado teórico y el simulado concuerdan.

3.3.4.2. Rotación máxima respecto al eje Y (θ)

El giro máximo se adopta cuando el actuador D3 llega a su longitud máxima.

Tabla 3.44. Posición y orientación de giro máximo en el eje Y (θ)

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255.39	0	35.29	0

Tabla 3.45. Longitud de actuadores en la posición y orientación de giro máximo en el eje Y (θ)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1083.54	1467.37	1534.98	1344.87	1232.3	1042.57
Recorrido del actuador (mm)	48.54	432.37	500	309.87	197.3	7.57

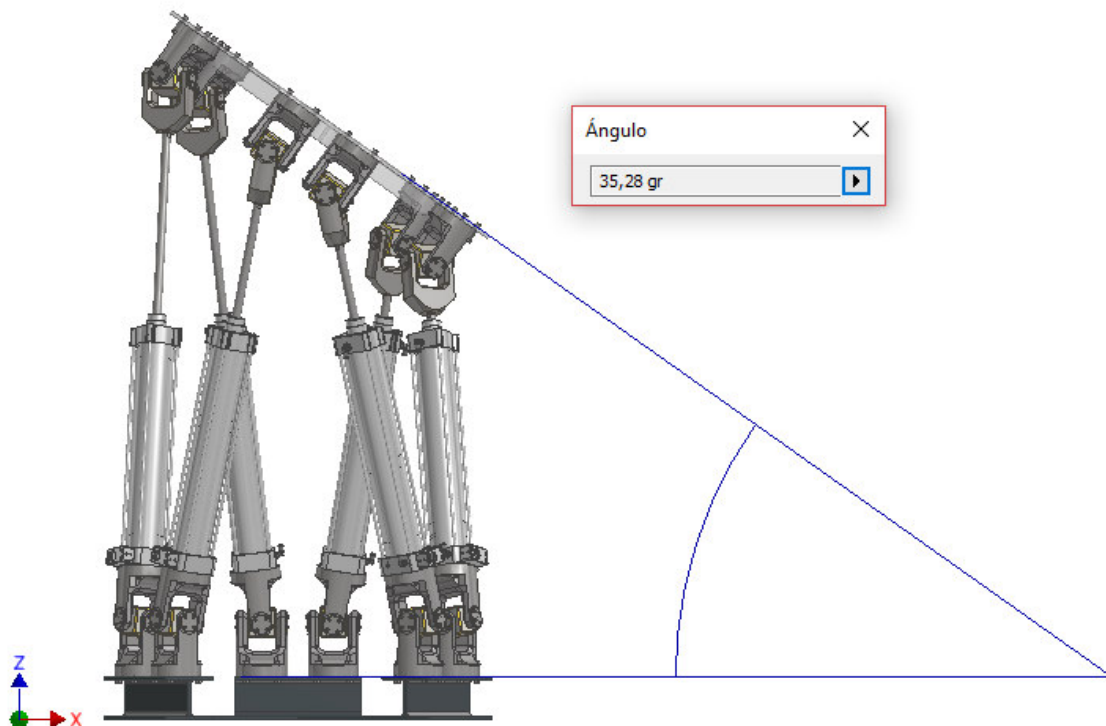


Figura 3.53. Ángulo de giro máximo respecto al eje Y (θ)

Como en el caso anterior, la medición en la simulación verifica los datos teóricos.

3.3.4.3. Rotación máxima respecto al eje Z (α)

El giro máximo se adopta cuando los actuadores D2, D4 y D6 llegan a su longitud máxima.

Tabla 3.46. Posición y orientación de giro máximo en el eje Z (α)

Posición de la plataforma móvil					
Px (mm)	Py (mm)	Pz (mm)	Ψ (°)	θ (°)	α (°)
0	0	1255.39	0	0	114.04

Tabla 3.47. Longitud de actuadores en la posición y orientación de giro máximo en el eje Z (α)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Longitud de la pierna (mm)	1384.88	1534.99	1384.88	1534.99	1384.88	1534.99
Recorrido del actuador (mm)	349.88	500	349.88	500	349.88	500

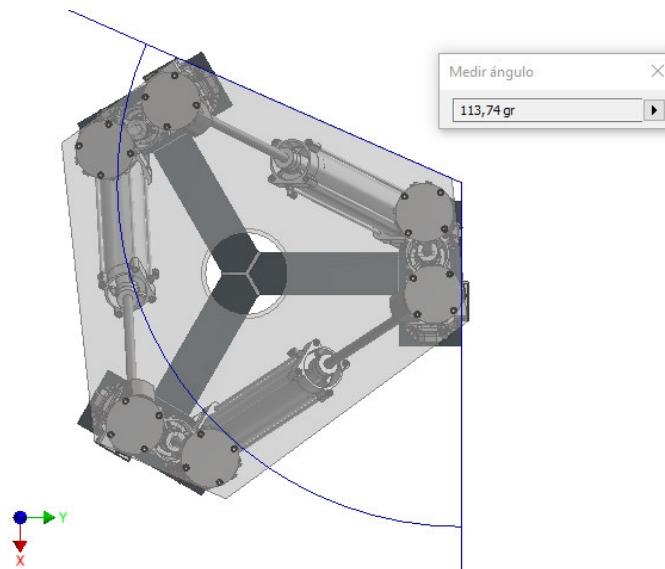


Figura 3. 54. Ángulo de giro máximo respecto al eje Z (α)

En este caso, existe un ligero error entre los datos teóricos y la medición simulada, debido a la dificultad de selección de las aristas indicadas para realizar una medición correcta.

3.3.5. Análisis tensional

Otro de los complementos CAE propios de Autodesk Inventor es el análisis y simulación tensional por elementos finitos, se trata de un entorno muy potente, el cual, divide la pieza a analizar en elementos más pequeños, llamados nodos, los cuales son evaluados, uno a uno, utilizando un sistema computacional, para después realizar un postprocesamiento y generar las animaciones y gráficos.

El análisis del robot completo es demasiado pesado y complejo como para realizarlo con un ordenador portátil, por ello, se analizan las piezas más desfavorables, bajo una hipótesis de carga máxima admisible para los actuadores.

Según la información obtenida de los actuadores Festo, cada uno admite una carga máxima de 4712 N en avance y 4417 N en retroceso, por lo tanto se toma el valor mayor.

Como la plataforma está formada por seis actuadores que se reparten la carga de manera equitativa, puede suponerse que la carga máxima en avance para todo el robot es de 28272 N, esta es la hipótesis de carga más desfavorable.

Una vez definida la carga, es necesario determinar que elementos son los más sometidos a cargas, como en toda máquina móvil, las zonas más débiles y sometidas a esfuerzos son las uniones, en este caso, existen dos uniones por brazo, siendo más desfavorable la unión inferior, ya que ha de soportar también el peso del propio robot.

Dentro de esta unión, existen varios componentes, de los cuales, el cabezal A, que une la pierna a la base fija es la más desfavorable, por lo tanto, esta pieza es una de las que se analiza.

Otra pieza que es objeto de análisis tensional es la base fija, ya que ha de soportar todo el peso del robot y de las cargas.

Por último, aunque la base móvil solo ha de soportar la carga, es necesario realizar un análisis, debido a que el material seleccionado es susceptible de presentar deformaciones, algo inadmisibles para el correcto funcionamiento de la plataforma Stewart-Gough.

Después de realizar las simulaciones, se genera un informe completo con los resultados , pudiendo comprobar si la pieza cumple o, por el contrario, sufre deformaciones excesivas que comprometan la integridad estructural del robot paralelo.

3.3.5.1. Análisis tensional del Cabezal A

Para una hipótesis de carga de 28272 N, situada en la plataforma móvil, se determina que cada una de las piernas sufre una carga de 4712 N, los cuáles son transferidos desde la base superior hasta en Cabezal a estudiar, pero este cabezal soporta toda esa carga en dos ejes, entre los que, de forma equitativa, se reparten la carga, por lo tanto, se suponen dos cargas de 2356 N como condición de contorno de carga, una sobre cada eje, la restricción se sitúa en la base del cabezal, y se realiza el análisis, del cuál se obtienen los siguientes resultados:

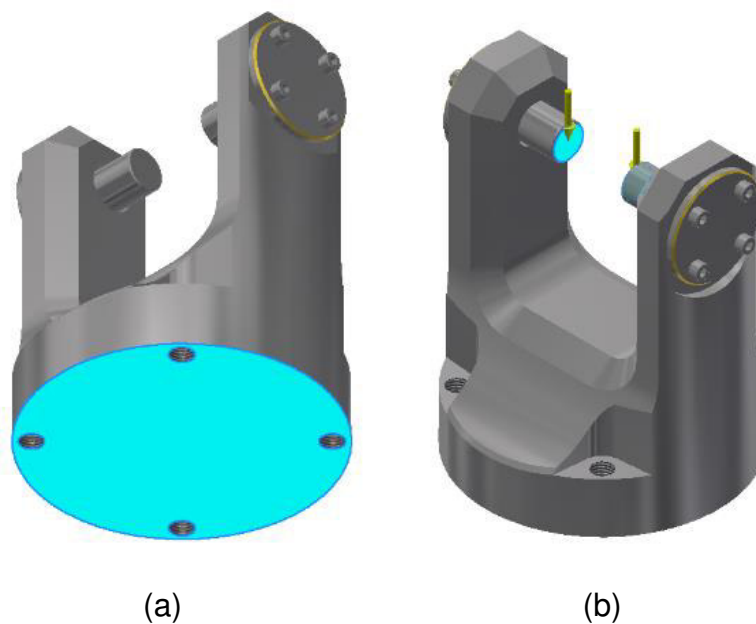


Figura 3.55. Restricción (a) y carga (b) de la simulación tensional del cabezal A

De los resultados obtenidos, los principales son:

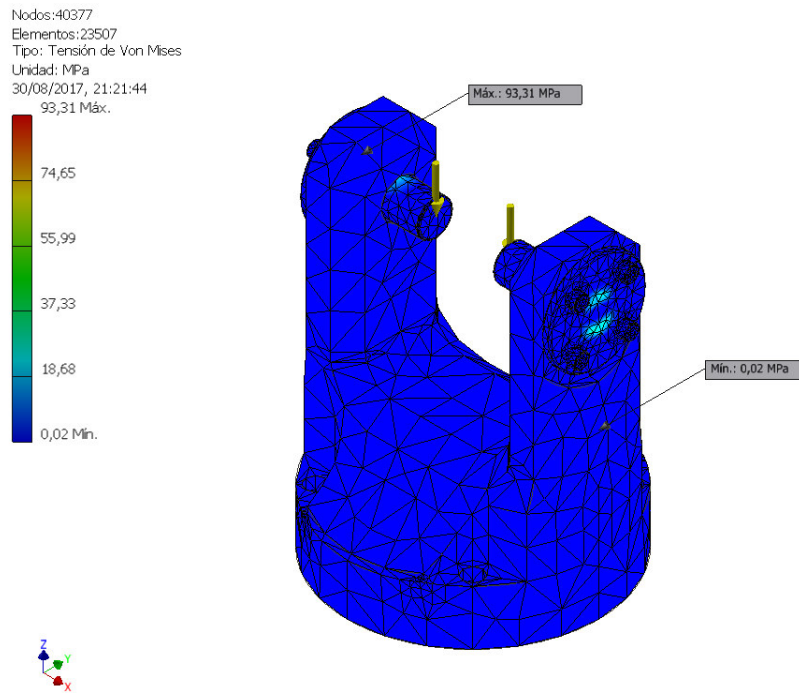


Figura 3.56. Tensión de Von Mises en el cabezal A

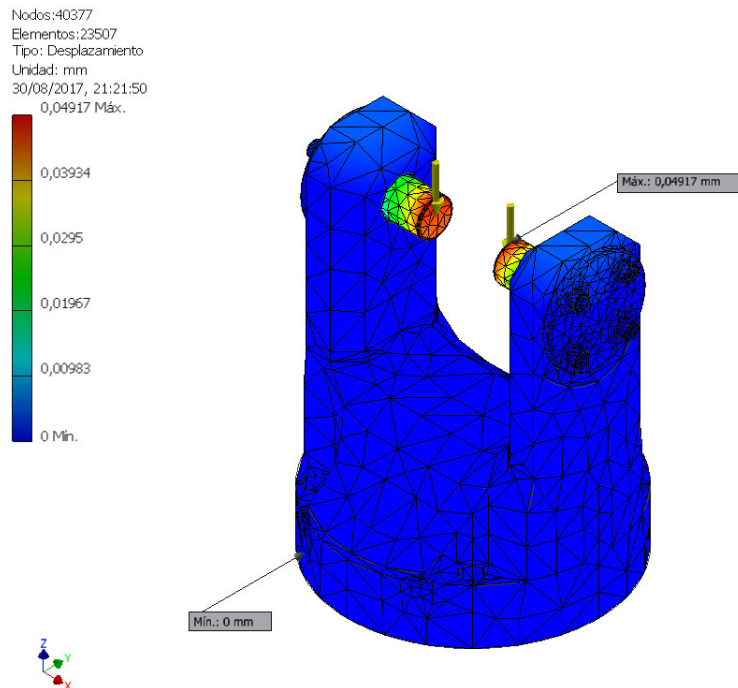


Figura 3.57. Desplazamiento sufrido por el cabezal A

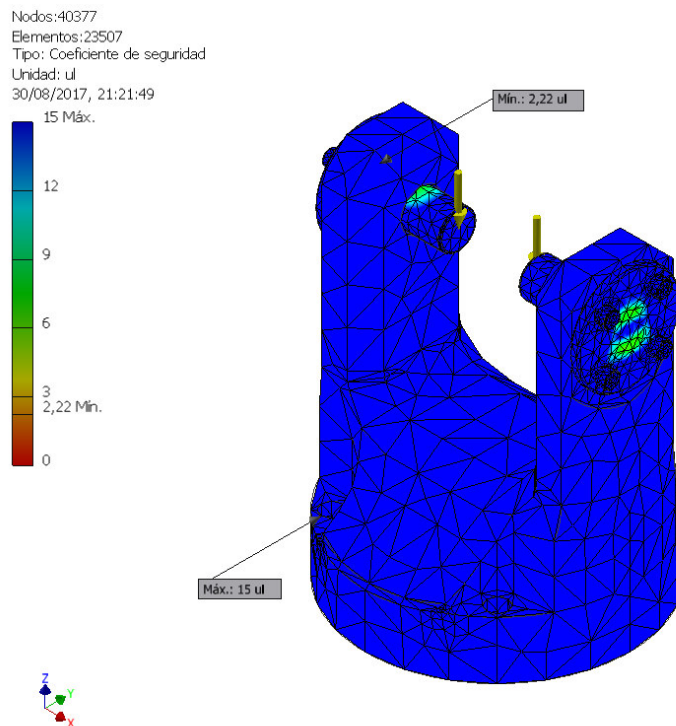


Figura 3.58. Coeficiente de seguridad del cabezal A

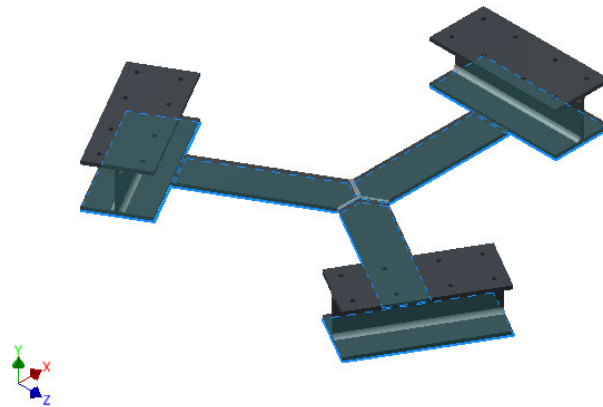
Como resultado, se comprueba que el cabezal A cumple y es capaz de soportar los esfuerzos, el material de la pieza es acero, cuyo límite elástico es de 210 MPa, y como se observa en la figura 3.56, la tensión de Von Mises máxima que sufre la pieza es de 93.31 MPa.

En la figura 3.57 se observa como el desplazamiento máximo es prácticamente nula, de 0.05 mm.

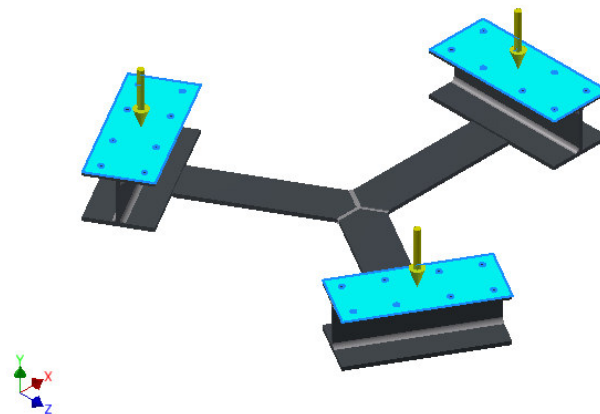
La figura 3.58 muestra el coeficiente de seguridad de la pieza, para un diseño óptimo, lo más indicado es mantener un límite mínimo de coeficiente entre dos y cuatro, en la pieza, este valor se sitúan en 2.2, por lo tanto, se concluye que la pieza es adecuada para el robot.

3.3.5.2. *Análisis tensional de la base fija*

Se realiza un análisis igual al anterior, pero en este caso, la carga es de 9424 N sobre cada una de las chapas perforadas que se unen con las piernas, debido a que sobre cada una de ellas recae la carga de dos piernas.



(a)



(b)

Figura 3.59. Restricción (a) y carga (b) de la simulación tensional de la base fija

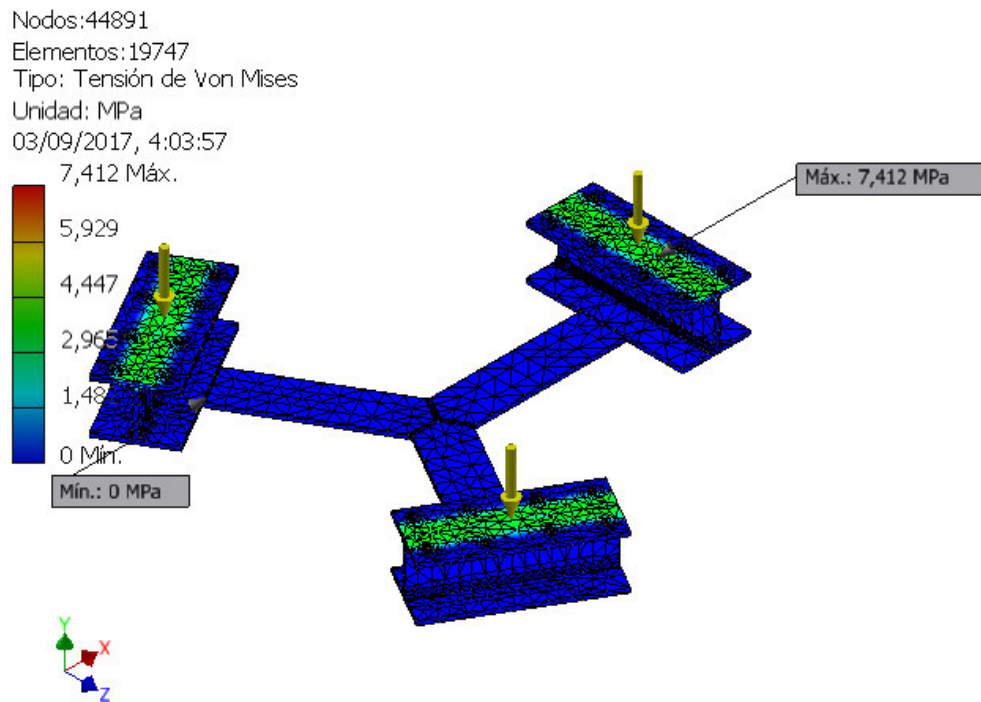


Figura 3.60. Tensión de Von Mises en la base fija

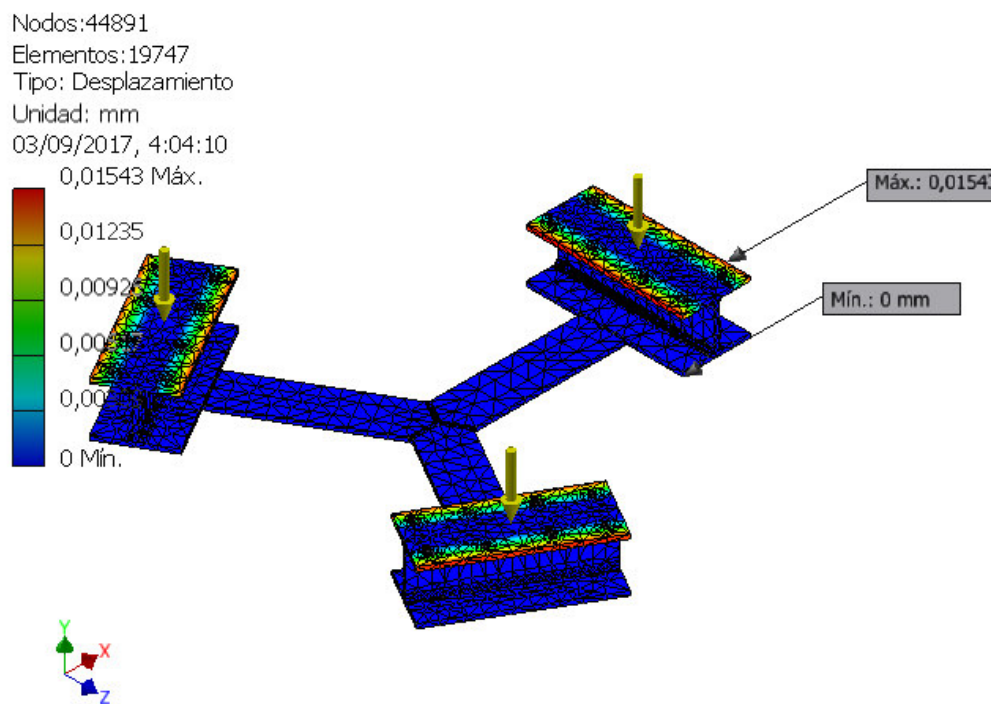


Figura 3.61. Desplazamiento sufrido por la base fija

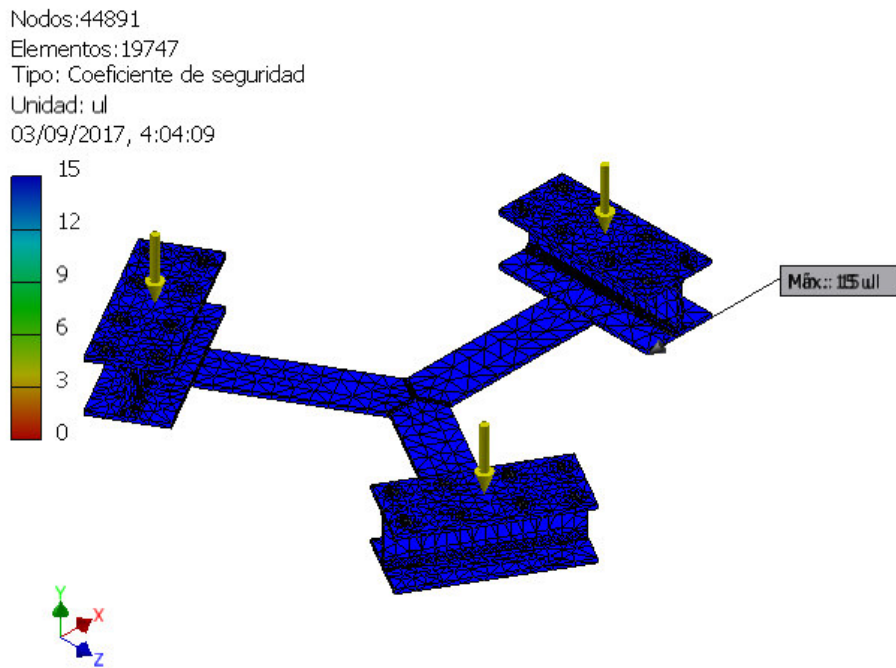


Figura 3. 62. Coeficiente de seguridad de la base fija

Esta pieza, sufre una tensión de Von Mises máxima de 7.412 MPa, un desplazamiento máximo de 0.015 mm y un coeficiente mínimo de 15, por lo tanto puede asegurarse, con absoluta certeza, que la pieza cumple, y por mucho.

3.3.5.3. *Análisis tensional de la base móvil*

Por último, se analiza la plataforma superior, donde se coloca la carga, por lo tanto, sobre ella se sitúan los 28272 N.

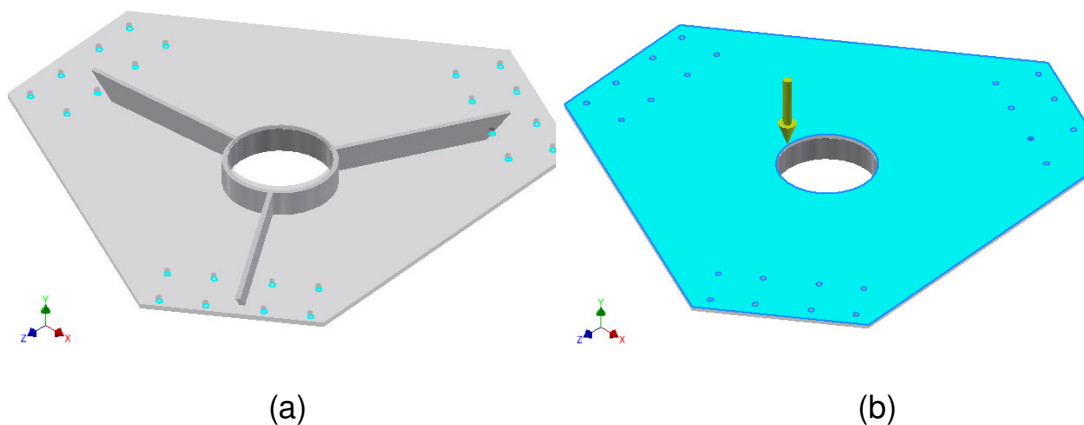


Figura 3. 63. Restricción (a) y carga (b) de la simulación tensional de la base móvil

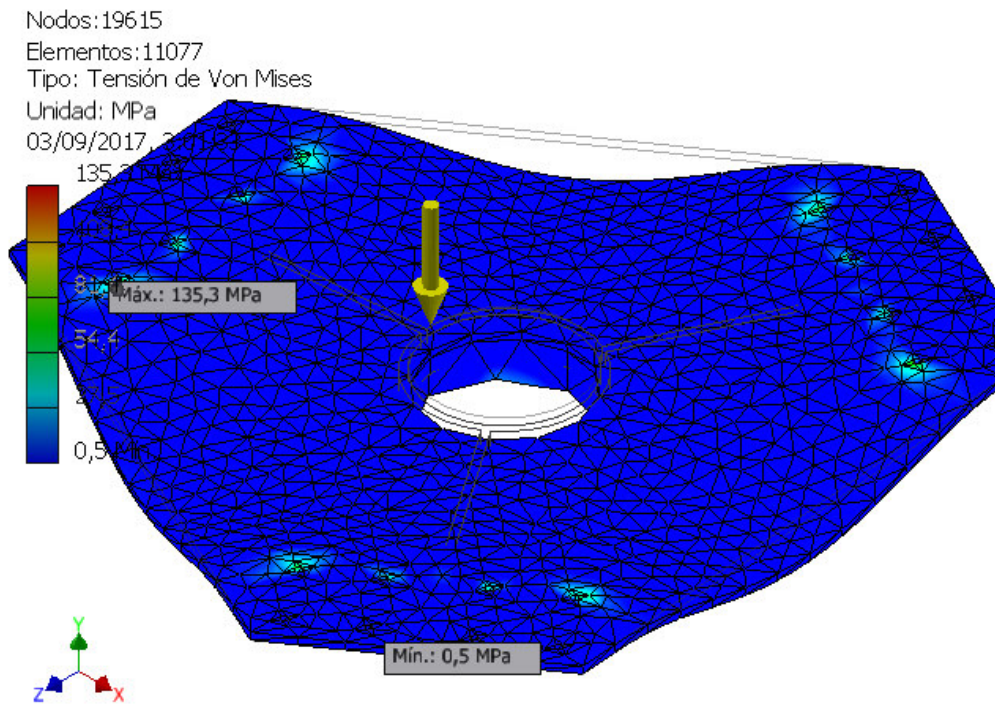


Figura 3.64. Tensión de Von Mises en la base móvil

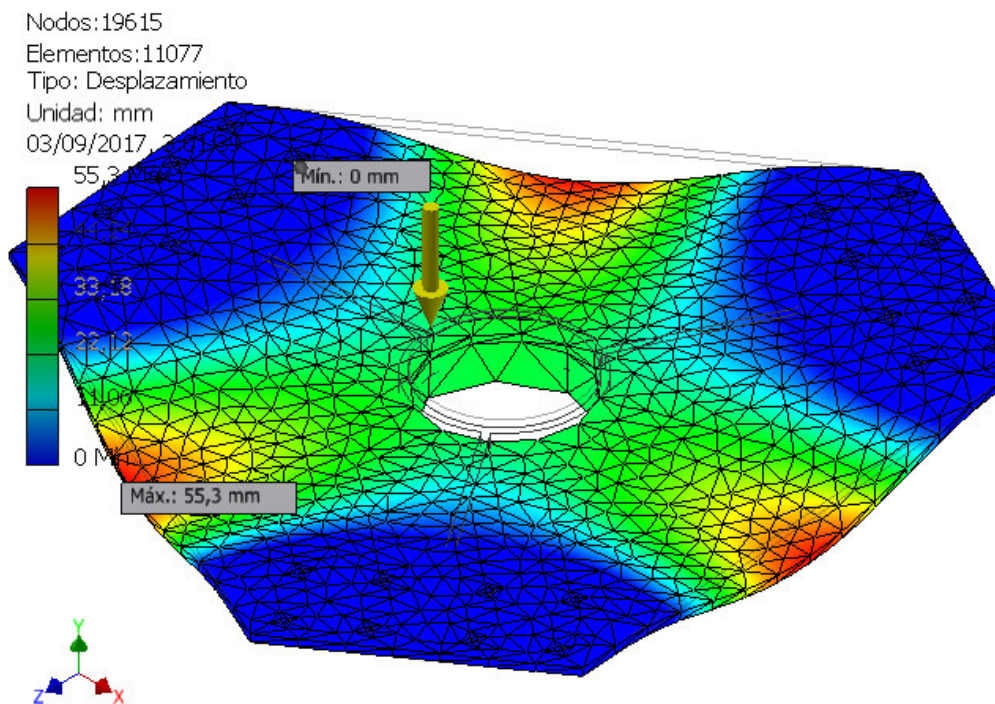


Figura 3.65. Desplazamiento sufrido por la base móvil

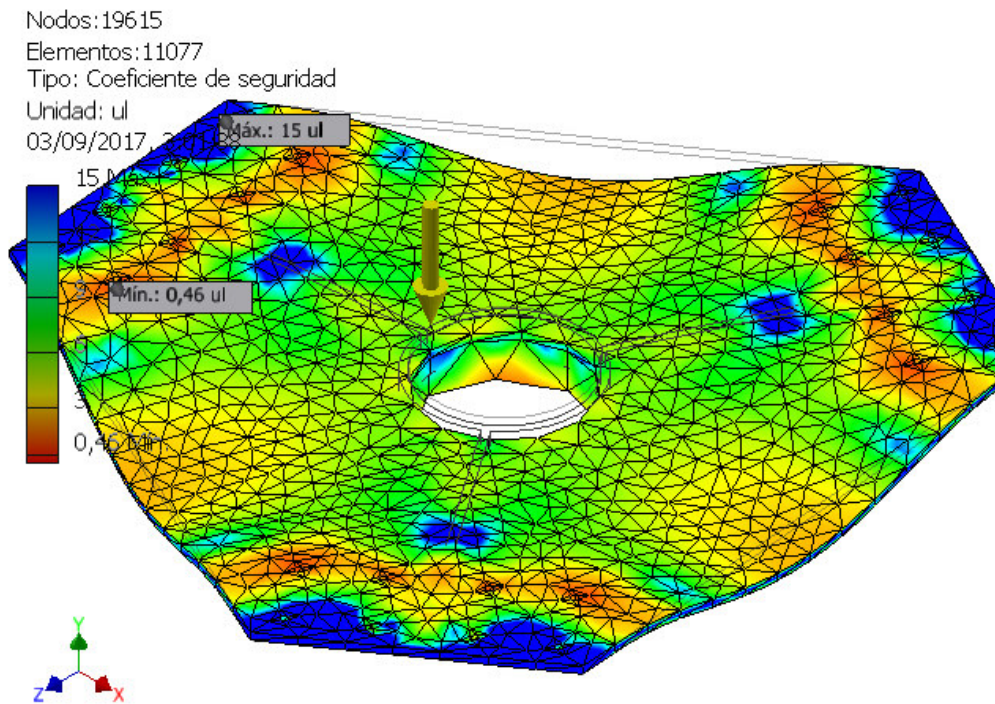


Figura 3. 66. Coeficiente de seguridad de la base móvil

Esta pieza es la más problemática, es de policarbonato, con un límite elástico de 62.01 MPa y un límite último de 68.9 MPa, y debido a la hipótesis de carga, la plataforma sufre una tensión máxima de 135.3 MPa, lo que significa que la pieza no sólo se deformará, sino que romperá en el momento de situar la carga.

Los datos obtenidos de la deformación máxima, de 55.3 mm, y del coeficiente de seguridad, de 0.46, corroboran estos resultados.

Es necesario cambiar el material por otro más resistente y que sea ligero, el acero sería suficiente, pero demasiado pesado, construir la pieza completamente de aluminio es la solución óptima, ya que es más ligero que el acero y posee unas características mecánicas similares, un límite elástico de 275 MPa, suficiente para soportar la carga.

Capítulo IV: Diseño de un prototipo

4.1. Descripción general

Con el fin de comprobar la funcionalidad de una plataforma Stewart-Gough en la realidad, se crea una maqueta en tamaño reducido, para ello, se diseña de nuevo un robot completo, pero siguiendo la estructura y la base del robot a tamaño real, para que así, sean lo más semejantes posible.

Para el diseño de cada una de las piezas, se continúa empleando el software Autodesk Inventor, desarrollando todo el proceso de la misma manera, aunque sin la necesidad, en este caso, de realizar ningún análisis ni simulación.

En esta estructura, se emplea un sistema distinto de uniones, cada pierna está compuesta por un par prismático actuante sin posibilidad de giro, una junta esférica superior y una junta universal inferior, de este modo se puede demostrar la certeza de los resultados descritos en el apartado 2.3. "Grados de libertad", en el que se detalla como esta configuración de conexiones posee también 6 grados de libertad.

Una vez están todos y cada uno de los componentes del robot diseñados y modelados digitalmente, se procede a la obtención real de las piezas mediante el uso de una impresora 3D.

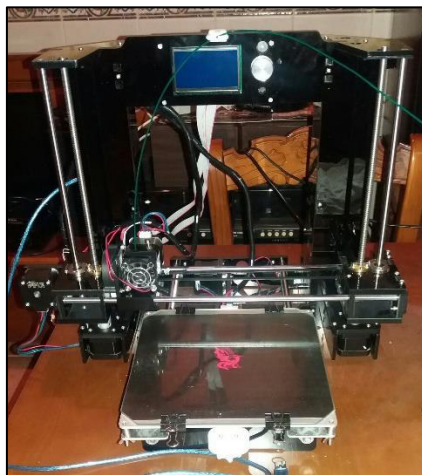


Figura 4.1. Impresora Anet A6

En concreto, la impresora empleada es la “Anet A6” (Figura 4.1.), una impresora con un volumen de impresión de 220x220x250 mm y con una resolución de capa de 0.05-0.3 mm, con capacidad de impresión de materiales como plásticos ABS², HIPS³, PLA⁴ y demás.

Para las piezas de la maqueta, el material empleado es plástico PLA de diámetro 1.75 mm, debido a que sus características mecánicas son idóneas para la fabricación de la maqueta.

Tabla 4.1. Especificaciones mecánicas del plástico PLA [25]

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



Figura 4. 2. Rollo de plástico PLA blanco para impresión 3D

² ABS: Termoplástico duro, resistente al calor y a los impactos..

³ HIPS: Poliestireno de alto impacto.

⁴ PLA: Polímero constituido por moléculas de ácido láctico.

4.2. Diseño de la maqueta

En el diseño previo de la maqueta, se establece la configuración que se desea adoptar para la maqueta a escala, de la misma manera que en el robot a tamaño real, ambas plataformas poseen la misma configuración geométrica, un hexágono con lados iguales tres a tres de manera intercalada, situando en sus vértices las uniones entre bases.

Tanto la base móvil como la fija tienen una estructura con la misma dimensión, aunque posteriormente en la etapa de diseño puedan presentar formas distintas debido a la finalidad que ha de tener cada una.

La unión a la base, aunque se toma como una unión universal, no es posible fabricarla por las dimensiones reducidas de la maqueta, para solventar este problema, se crea una pieza capaz de hacer girar a la pieza, en relación a la base fija, en dos ejes perpendiculares.

La unión superior es una junta esférica, de tal manera que la base pueda girar libremente con relación a la base, de no utilizar este tipo de unión, se reducirían los grados de libertad del robot.

La parte más importante en el diseño de la maqueta es la junta actuante, la cuál, para conferir a la plataforma 6 grados de libertad justos, y evitar grados de libertad pasivos, ha de ser puramente prismática, evitando la posibilidad de giro del vástago con respecto al cuerpo del actuador.

Comercialmente, encontrar un actuador prismático a esta escala reducida es complicado y costoso, por ello, haciendo valer el ingenio, se diseña un mecanismo basado en el giro de un microservo (motor de uso muy extendido y de fácil obtención), y la configuración de un sistema de barras biela-manivela, capaz de convertir el giro del microservo en el avance o retroceso del vástago.

De esta manera, se obtiene el diseño de una plataforma paralela Stewart-Gough en tamaño reducido, con seis grados de libertad y en teoría, completamente funcional.

4.3. Modelado y fabricación de piezas

El diseño de cada uno de los componentes del robot, se lleva a cabo con Inventor, realizando los mismos pasos anteriores en el modelado del robot real.

Se crean un total de nueve tipos de piezas diferentes, pensando en el correcto funcionamiento de ellas como conjunto y en la facilidad de montaje, de tal manera que éste pueda realizarse de una manera secuencial y sencilla.

Cuando todas las piezas están terminadas, se exportan a formato “.stl” (Standard Triangle Language), debido a que este formato es el empleado por la gran cantidad de programas de preparación, pre visualización, modificación e impresión en 3D . El software de impresión 3D empleado para la fabricación de piezas es “Simplify3D”, un programa profesional, pero de uso muy extendido, mediante el cual, a través de una simple conexión USB, se imprimen todas las piezas diseñadas y modeladas, una a una o, en caso de ser de reducido tamaño, varias a la vez, para así ahorrar tiempo. El tiempo total de impresión de la maqueta, a una calidad media, es de 7 horas y 32 minutos teóricos, en la realidad este tiempo suele extenderse bastante.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta, a la hora de imprimir las piezas, es la colocación y orientación de estas en la cama de impresión. Esto se debe a que, las impresoras 3D de extrusión de plástico, crean la pieza depositando material capa sobre capa, esto tiene como consecuencia que, los objetos impresos, no posean la misma rigidez en las tres direcciones, siempre existe un eje de rotura fuerte, perpendicular a las capas, y dos ejes mas débiles, paralelos a las capas.

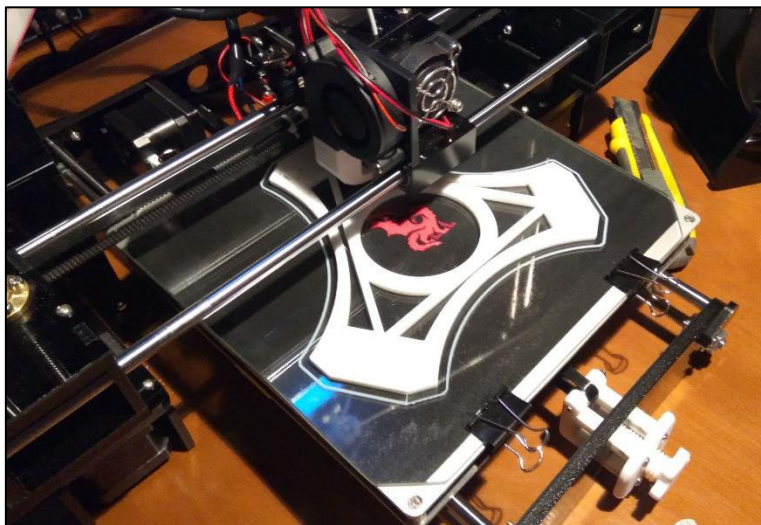


Figura 4.3. Impresión 3D de la base de la maqueta

4.3.1. Base fija de la maqueta

Para modelar esta pieza, hay que tener en cuenta el tamaño de impresión que ofrece la impresora, por lo tanto, la base ha de entrar dentro de un cuadrado de 22x22 mm, dentro de estos límites, se modela una estructura hexagonal base, con los lados iguales 3 a 3 de manera intercalada, de longitudes $c_1=35$ mm y $c_2=118.125$ mm.

A partir de aquí, se da forma a la base, buscando la máxima estabilidad y rigidez posible y, posteriormente, en los vértices del hexágono de referencia, se construyen soportes agujereados para que luego, en el montaje, los ejes de giro de las uniones bidireccionales rotatorias queden justo sobre los vértices.

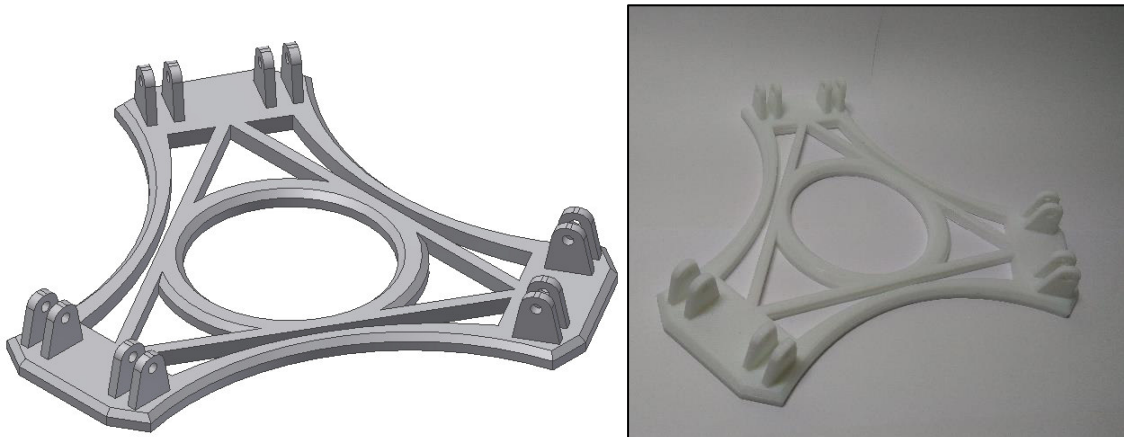


Figura 4.4. Base fija de la maqueta digital y real

4.3.2. Unión bidireccional rotatoria

Esta es una pieza simple, la cuál, sólo ha de tener dos orificios, en planos perpendiculares y a distintas alturas, donde se alojan los tornillos que sirven como ejes de giro.

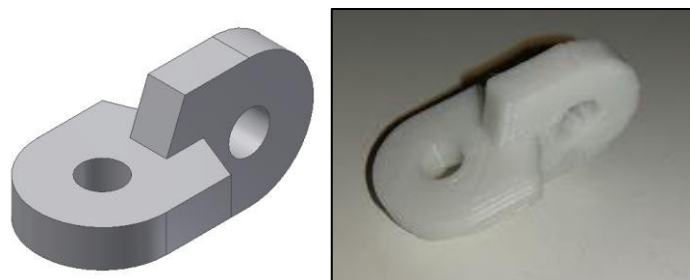


Figura 4.5. Unión bidireccional rotatoria digital y real

4.3.3. Cuerpo del actuador

Se trata de la pieza más importante y más compleja de diseñar, ha de albergar el micro servo y el vástago de movimiento, además de el adaptador para unirse a la base de una forma correcta.

Lo primero es modelar el adaptador de unión, de tal manera que el brazo de giro del servo esté orientado hacia el exterior.

Una vez acabado eso, se construye un soporte para la colocación del micro servo, empleando las medidas dadas por el fabricante (Anexo III) y finalmente, se realiza el proceso más complejo.

Se crea una camisa, dentro de la cuál, el vástago, únicamente, pueda desplazarse, con topes en las zonas superior e inferior. La manera óptima de conformar esta estructura es mediante un hueco cuadrado dentro de la pieza, pero no completamente cerrado, ya que en el montaje hay que colocar el vástago en su interior.

Se deja una cara abierta, para poder insertar el conjunto móvil, y se generan unas superficies agujereadas a su alrededor, de este modo, la cara hueca, después de colocar las piezas en el interior, se cubre con una tapa, y ambos cuerpos se fijan mediante tornillos alojados en los agujeros diseñados previamente.

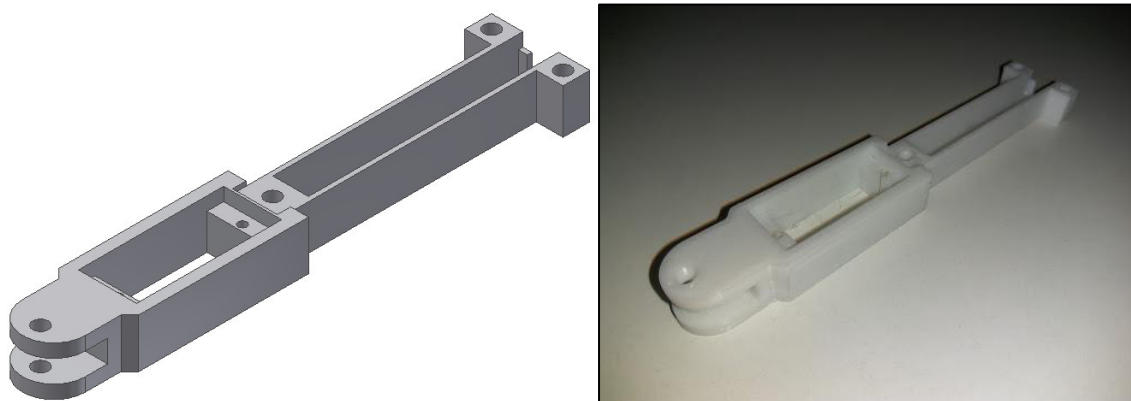


Figura 4.6. Cuerpo del actuador digital y real

4.3.4.Tapa del cuerpo del actuador

La tapa del cuerpo del actuador tiene como base de diseño y modelado el propio cuerpo, ya que ha de concordar con la cara abierta dejada en la segunda pieza, además de estar alineados también, los agujeros de ambos objetos, para alojar en ellos los tornillos de fijación.

A lo largo de la tapa, ha de crearse una abertura longitudinal y estrecha, para poder unir el conjunto móvil con el mecanismo de transmisión de movimiento biela-manivela.

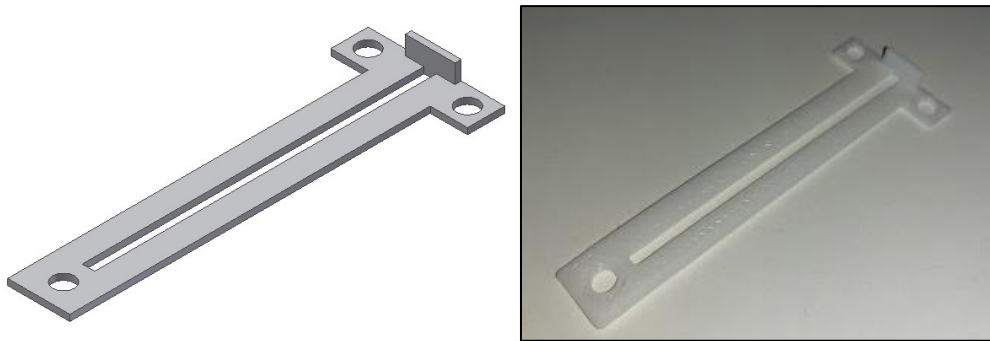


Figura 4.7.Tapa del cuerpo del actuador digital y real

4.3.5.Mecanismo biela-manivela

Este mecanismo es el que transmite y convierte el movimiento de giro del servo al movimiento de avance o retroceso del vástago, la longitud de la biela es muy concreta, es igual a la longitud existente entre el punto de unión con la manivela en la posición de giro mínimo y el punto de unión con el émbolo en la posición mínima de desplazamiento. Las uniones entre manivela y biela y entre biela y émbolo son diseñadas en inventor como elementos auxiliares, ya que en la realidad estas piezas se sustituyen por alambres y tornillería.



Figura 4.8. Biela digital y real

4.3.6. Émbolo y vástago

Esta pieza, inicialmente se diseñó como un único bloque, pero el vástago, al estar la pieza impresa en posición vertical, era débil y al sufrir esfuerzos se partía, como solución, se diseña la pieza en dos partes

Un émbolo rectangular, con unas dimensiones ligeramente inferiores a las del hueco del cuerpo del actuador, para poder desplazarse dentro de él, con un agujero en la parte frontal, donde se une con el mecanismo biela manivela y una abertura en la parte superior para situar en ella el vástago.

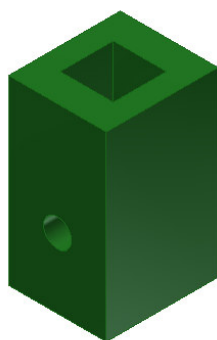


Figura 4.9. Émbolo digital y real

El vástago se crea a partir de la abertura de la parte superior del émbolo, de forma que encaje perfectamente dentro y se extruye con una longitud suficiente como para sobresalir por el orificio existente en la cara superior del cuerpo del actuador.

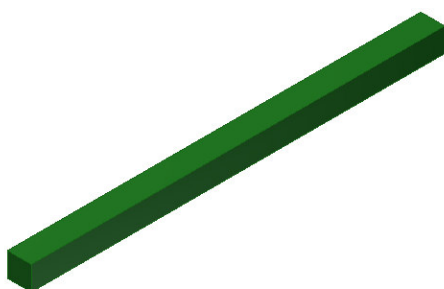


Figura 4.10. Vástago digital y real

4.3.8.Unión esférica

El correcto funcionamiento de esta pieza, depende en gran medida de un preciso diseño y modelado, ya que se han de diseñar dos piezas, una esférica y otra envolvente, pero siendo capaces de moverse una dentro de la otra sin que la parte interior se salga.

En ambos objetos hay que crear enganches de unión para poder ensamblar el robot, en la esfera interior se crea un agujero con un perfil igual al del vástago, introduciendo el segundo en el primero en el montaje, y en la pieza envolvente, se crea un enganche fijo, uniéndose a los vértices base de la plataforma superior.

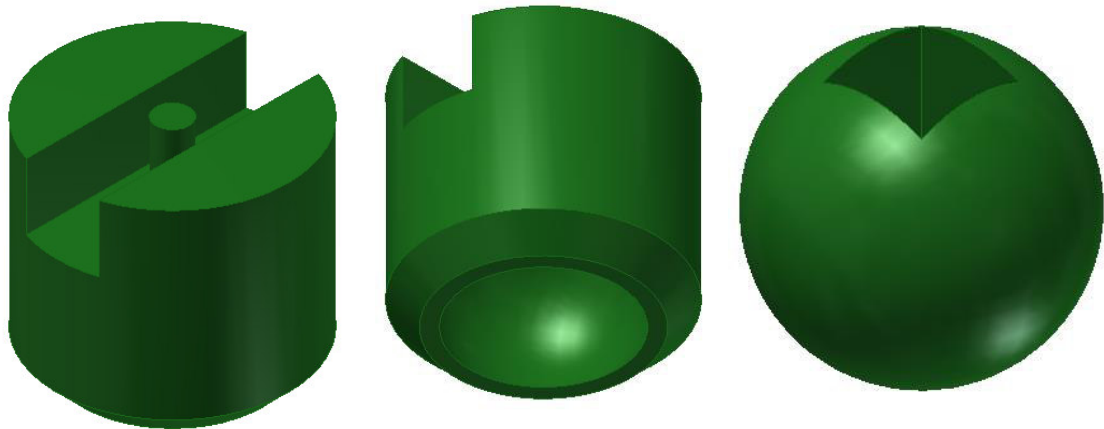


Figura 4.11. Partes de la unión esférica digitales

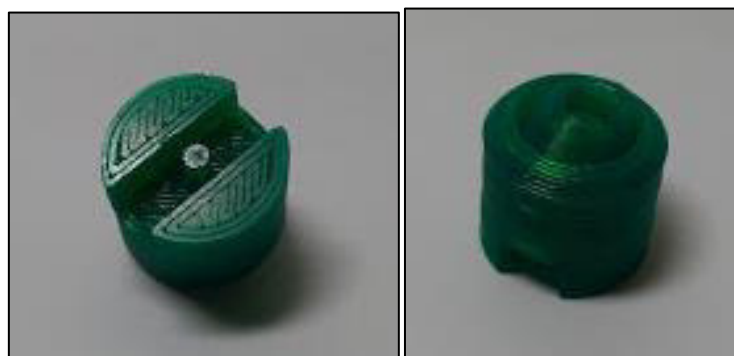


Figura 4.12. Unión esférica real

4.3.9. Plataforma superior de la maqueta

Las dimensiones base de esta pieza son iguales a las de la base fija, pero el modelado es distinto, en los vértices del hexágono base se crean agujeros para fijar las uniones esféricas y la base en sí, se constituye por una serie de barras, de tal manera que el resultado sea una pieza ligera y rígida.

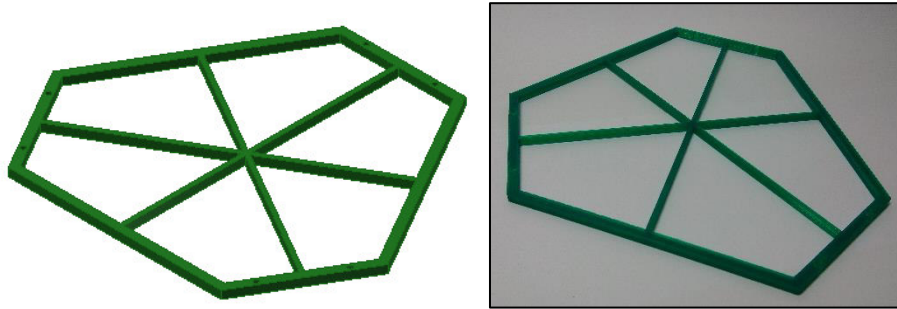


Figura 4.13. Base móvil digital y real

4.3.10. Montaje

Como resultado final del diseño, modelado, fabricación y construcción de la maqueta de una plataforma robótica paralela Stewart-Gough, se obtiene una estructura móvil y funcional y controlable.

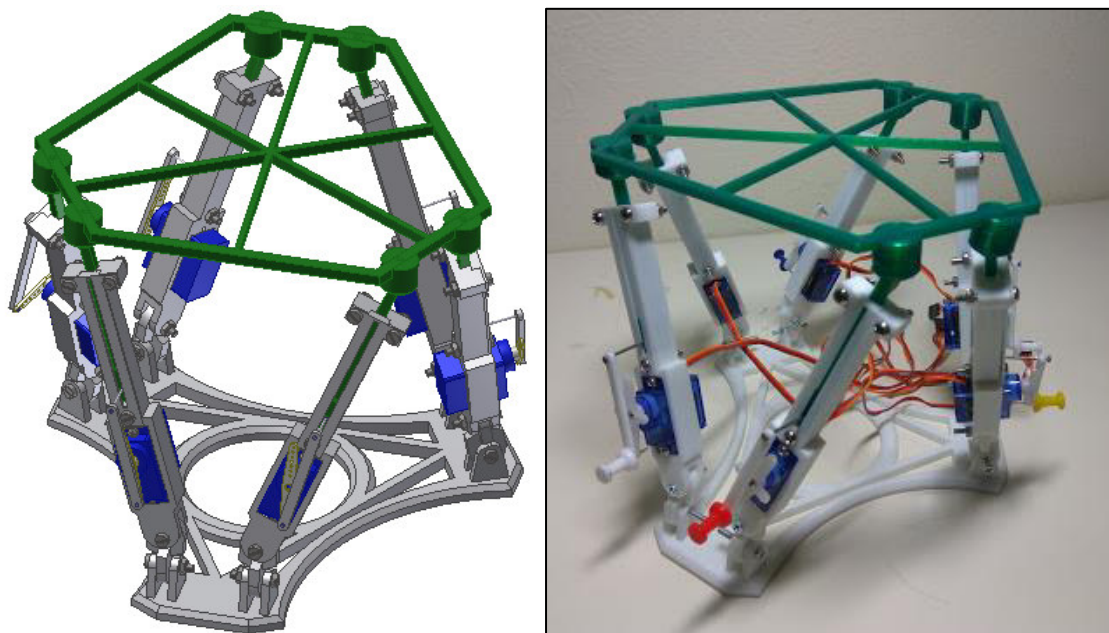


Figura 4.14. Maqueta digital y real

4.4. Control de posición del prototipo

Ya se han calculado y simulado las posiciones teóricas de una plataforma Stewart-Gough, tan sólo queda, plasmar esos movimientos en la realidad para poder observar el funcionamiento real de un robot de estas características.

El movimiento del prototipo es generado por el giro de seis microservos 9g, el cuál es transformado en un desplazamiento longitudinal positivo o negativo, por lo tanto, para posicionar de forma selectiva la plataforma, es necesario gobernar el giro de estos motores, para ello, existen numerosos microprocesadores capaces de manejar estos microservos.

El microprocesador elegido para llevar a cabo esta tarea es el "Arduino Uno", una tabla microcontroladora con 14 pines de entrada/salida digital y 6 pines de entradas analógicas.

La elección de esta tabla microprocesadora es principalmente por la sencillez de programación general y, aunque más concretamente, la programación de manejo de microservos. La programación empleado por Arduino está basada en el lenguaje informático C++, aunque posee sus propios comandos, también es posible emplear comandos del lenguaje general.

El funcionamiento de un motor servo o microservo se fundamenta en el control por modulación de ancho de pulsos o PWM. Esta modulación es un tipo de señal capaz de regular la tensión mediante la variación de frecuencia, cambiando el ciclo de trabajo, es decir, mediante la PWM se regula la señal enviada al microservo y en función de la frecuencia de esta señal, el microservo se posiciona entre 0° y 180°.

La placa "Arduino Uno", posee 6 pines PWM (dentro de los 14 pines digitales), justo las salidas requeridas para controlar los 6 servos que desplazan al robot, además, Arduino tiene incorporada una librería completamente preparada para el control de servos, reduciendo la programación, básicamente, a indicar que posición ha de alcanzar cada servo, la librería se encarga de traducir ese ángulo a la frecuencia correspondiente y enviarla al actuador.

Cada uno de los servos se conecta a cada una de las salidas PWM, asignadas en la placa a los pines digitales 3,5,6,9,10 y 11 Y se alimenta mediante una fuente de alimentación externa a 5 voltios.

La placa se alimenta directamente mediante la conexión USB al ordenador portátil.

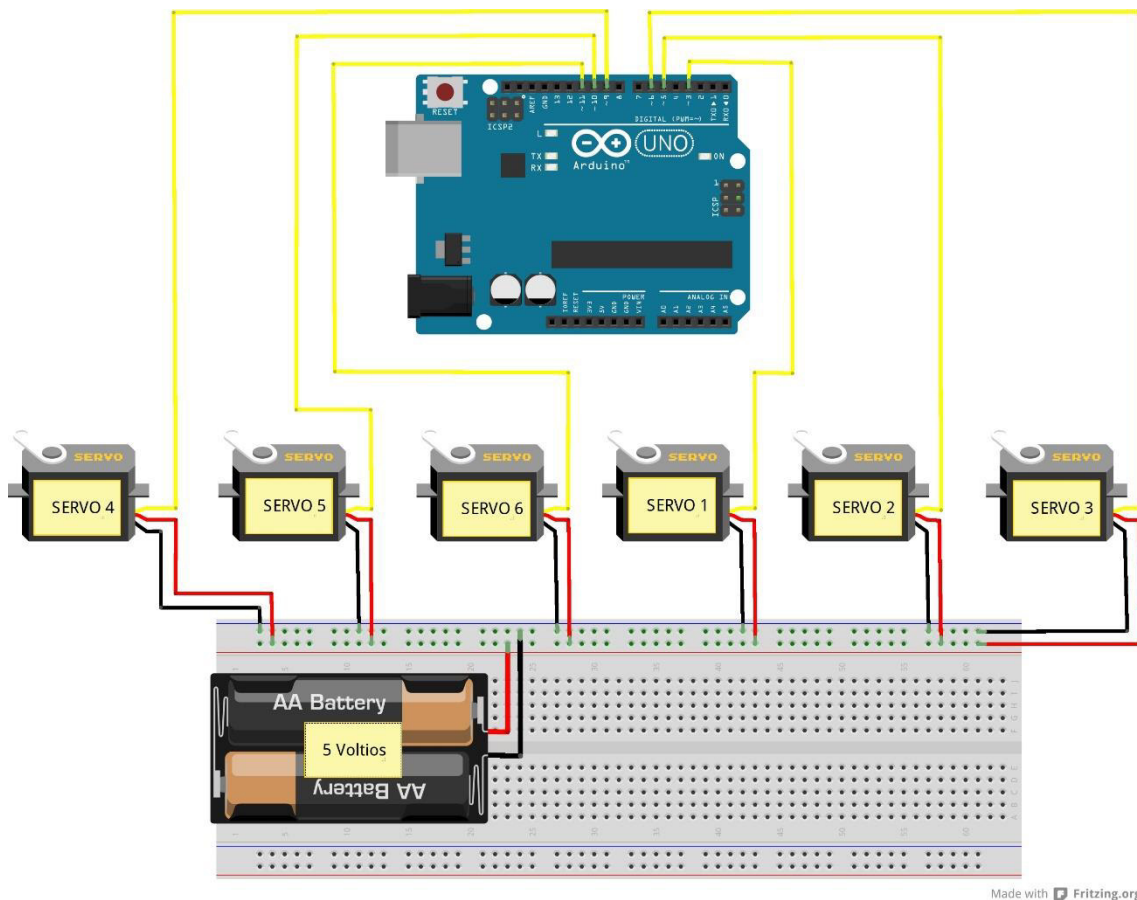


Figura 4.15. Diagrama de conexiones del prototipo

Ya es posible situar los servos en la posición que se desee, pero es necesario traducir ese giro al desplazamiento del actuador y, mediante una sencilla conversión de proporcionalidad es posible conseguirlo.

Es necesario conocer las longitudes máxima y mínima que puede alcanzar cada una de las piernas de la maqueta, esto podría realizarse de igual modo que en el apartado 3.3.1. "Cálculos posicionales", simulando y midiendo en inventor estas posiciones y, de ello, obtener la longitud de carrera, pero, al conocer la longitud del brazo del servo, que es de 15 mm, se puede obtener la carrera de forma simple.

Montando los servos de tal manera que, la posición mínima del actuador, coincida exactamente con la posición vertical y hacia abajo del brazo del servo, cuando la posición del actuador sea máxima, el brazo estará en posición vertical hacia arriba, habiendo dado media vuelta completa y desplazando el vástago una distancia igual al diámetro del círculo formado por el giro, es decir, una carrera de 30 mm.

Hay que tener en cuenta que, al colocar el servo de esta manera, la posición de 0° es la superior y la de 180° la inferior, por lo tanto, la proporcionalidad tiene que ser inversa, es decir, cuanto más desplazamiento, menos giro.

Conociendo todos estos datos, se sitúa un punto de referencia medio, un ángulo de 90° corresponde a un desplazamiento de 15 mm, y desde ese punto se realiza la conversión mediante proporcionalidad, y restando a 180 el valor obtenido, se consigue el ángulo buscado para la longitud inicial establecida.

Todo esto, se incorpora a un nuevo programa de Matemática con la misma estructura que el generado para el robot simulado, pero actualizando las longitudes de las bases y de las posiciones máximas y mínimas a las características de la maqueta.

Ya es posible situar el prototipo en cualquier posición deseada, por lo tanto, se genera una secuencia de posiciones en cada una de las direcciones y sentidos de los seis grados de libertad propios del robot, mediante el programa de Matemática generado, se calculan las longitudes de carrera necesarias para alcanzar dicha ubicación, en cada uno de los actuadores, y se programan en la placa Arduino, ya traducidas a ángulos, para que, el propio robot, cambie de posiciones automáticamente, mostrando los grados de movilidad de la plataforma y verificando todos los estudios realizados.

Capítulo V: Conclusiones

5.1. Conclusiones técnicas

Todos los objetivos marcados inicialmente en este trabajo, se han completado y cumplido de una manera bastante exitosa, llegando a crear con éxito, simulaciones digitales y en la realidad muy parejas a los datos teóricos calculados.

De todo el desarrollo del trabajo se puede concluir que, la plataforma Stewart-Gough, es un robot paralelo muy sofisticado y complejo, con una estructura hexápoda, que mediante estas 6 piernas actuadoras, une dos bases, una fija y otra móvil.

Este robot es capaz de situar de manera rápida y precisa su plataforma móvil gracias a los 6 actuadores lineales incorporados en cada pierna. Concretamente, es capaz de adoptar cualquier posición y orientación en el interior de su espacio de trabajo, dentro de sus límites máximos. Este alto nivel de movilidad espacial es debido a la configuración de uniones de sus piernas, confiriendo al robot 6 grados de libertad, 3 de traslación y 3 de giro.

Además, no existe una única configuración que genere estos 6 grados de libertad, sino que, según lo estudiado, existen varias configuraciones de juntas capaces de crear esta característica. Cada pierna puede estar compuesta de dos uniones esféricas en los extremos y un par prismático como par actuante, también, una configuración aceptable es, situar en un extremo una junta esférica, en el otro extremo una junta universal y en el centro de la pierna un par prismático actuante y, por último, colocar en ambos extremos dos juntas universales y al par prismático actuante, permitirle girar. De cualquiera de estas maneras, el robot sigue teniendo el mismo grado de movilidad, como se ha demostrado en las simulaciones digital y real, ya que cada una tiene una unión distinta.

Mediante la programación y optimización del programa creado en Mathematica de resolución del PPI se han obtenido datos que, tras su posterior análisis y comparación con los datos simulados, puede concluirse que son correctos, siendo el programa capaz de situar la plataforma en la posición deseada con un error mínimo, según los datos obtenidos, el error medio posicional del robot es de 2.37 mm, un valor

despreciable comparado con la amplitud de desplazamiento en cada uno de los ejes cartesianos, que es del orden de 500 veces menor que la variación de desplazamiento en el eje Z, que es la menos amplia de las 3.

Los resultados de los diseños y ensamblajes, también han resultado satisfactorios a la hora de posicionar correctamente la plataforma en la posición deseada y, al ser capaz de ejecutar movimientos con suficiente fluidez y dinamismo. No ocurre lo mismo con la resistencia e integridad estructural ya que, a máxima carga, el modelado de la base fija no es el adecuado y, debido a ello, la pieza colapsa, por lo que, es necesario un remodelaje de esta pieza, cambiando el material del que está compuesto, policarbonato, por uno más resistente pero que a la vez, sea ligero, el aluminio.

En la simulación real, el programa de posicionamiento directo adaptado también es capaz de situar la pieza en las posiciones correctas, siendo capaz de convertir la longitud de carrera requerida por cada actuador en un ángulo, de tal manera que el microservo de cada pierna, sea el actuador que sitúe la plataforma en la posición requerida.

Los resultados de resistencia del robot son también favorables, siendo capaz de moverse por sí mismo sin sufrir ningún daño.

La limitación del estudio a un solo tipo de posicionamiento, deja una puerta abierta a futuras investigaciones sobre análisis de velocidades, de aceleraciones, inerciales, y no solo mecánicas, también se abre un gran abanico de posibilidades en general, ya sea para la implementación de programas de control automáticos más sofisticados, tales como la implementación de controles PID, o la implementación y diseño de robots paralelos a nuevas aplicaciones reales, como en la robótica antropomórfica, dentro de la cuál, el grado de movilidad de estos robots se asemeja mucho a la movilidad de articulaciones como el cuello o el torso.

En definitiva, puede decirse que, la plataforma Stewart-Gough, es un robot con pasado, con presente y, sobre todo, con mucho futuro por explorar.

5.2. Conclusiones personales

En un terreno más particular y subjetivo, la realización de este trabajo me ha supuesto un gran esfuerzo, pero, realizado con gusto, ya que, en este trabajo he podido plasmar los atractivos que la ingeniería, en general, crea en mí.

He podido dar un poco más rienda suelta a mi originalidad y a mi ingenio para diseñar dos robots distintos, completamente a mi gusto, y ser capaz de hacerlos funcionar de forma correcta por mi mismo.

Crear cosas nuevas que, por decirlo de alguna manera, sean puramente mías, es lo que me ha empujado a realizar este trabajo, eso, unido a la posibilidad de implementar conocimientos y herramientas de otras ramas distintas a la mía, como de la electrónica.

Creador, innovador, investigador, soñador, son términos que para mí, son sinónimos de ingeniero y, este trabajo, me ha permitido sentirme ingeniero de verdad.

Bibliografía

- [1] L. Ángel Silva, Control visual de robots paralelos. Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis., Madrid, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2005.

- [2] ABB. IRB 1200, a compact, flexible, fast and functional small industrial robot (n.d). Obtenida de <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-1200> [Junio de 2017]

- [3] Adept. Quattro Robot El robot más rápido del mercado. (n.d.). Obtenida de <http://www.adeptiberica.com/es/quattro-robot> [Junio de 2017]

- [4] H. A. Moreno Avalos, publicado el 12 de septiembre de 2012. Robots Paralelos, Conceptos y Aplicaciones. Obtenido de <https://www.slideshare.net/htrmoreno/robots-paralelos> [Junio de 2017]

- [5] J.A.Gómez Portilla,J.V. Guacaneme González : Diseño e Implementación de una Plataforma de Stewart. Universidad militar nueva granada Bogota. Facultad De Ingeniería.Programa De Mecatrónica

- [6] Y. D. Patel, P. M. George: Parallel Manipulators Applications—A Survey. Department of Mechanical Engineering, A. D. Patel Institute of Technology, New Vallabh Vidyanagar, India 2 Department of Mechanical Engineering, Birla Vishvakarma Mahavidyalaya Engineering College, Vallabh Vidyanagar, India. Published Online August 2012

- [7] K. H. Hunt, «Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot-Arms,» Trans., and Automation 105(4), pp. 705-712, 01 Dec 1983.

- [8] C. Earl y J. Rooney, «Some kinematic structures for robot manipulator designs,» Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Designournal of Mechanisms, vol. 105, nº 1, pp.15-22, 1983.

- [9] V. E. Gough y S. G. Whitehall: Universal tire test machine. Proceedings 9th. Int. Technical Congress F.I.S.I.T.A., 117, 1962.
- [10] D. Stewart: A platform with six degrees of freedom. . Proc. Institution of Mechanical Engineers, 180, 1965.
- [11] H. Gonzalez, M. S. Dutra, O. Lengerke, Direct and inverse kinematics of Stewart platform applied to offshore cargo transfer simulation, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, 19-25 June, 2011.
- [12] L. Wen, Tsai. Robot Analysis: The mechanics of Serial and Parallel manipulators. Department of Mechanical Engineering and Institute for Systems Research, University of Maryland, United States of America, 1999.
- [13] J. A. Cabezas Flores, M. A. Lorenzo Fernández: Mecánica de Robots, tema 2. Departamento Ingeniería Mecánica. E.T.S. de Ingeniería Industrial (Béjar). Universidad de Salamanca.
- [14] A. Froilan, (n.d.), Ángulos de euler aplicado a la robotica. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/247303445/ANGULOS-DE-EULER-APLICADO-A-LA-ROBOTICA> [Junio de 2017]
- [15] J. L. Burrueco Jiménez : Diseño, fabricación y puesta en marcha de una Plataforma Stewart para simulación. Grado en Ingeniería Mecánica. Universidad de Vigo, 2014-2015.
- [16] Eclipse 500 Simulator. Published: 10 April 2012. Last Updated: 04 June 2016. Obtenido de <http://www.flyradius.com/eclipse-500/simulator> [Agosto de 2017]
- [17] S. Martínez. 25 abril 2017. Sesión de simulador en indy para Fernando Alonso. Obtenido de <http://www.caranddriver.es/formula-1/sesion-de-simulador-en-indy-para-fernando-alonso> [Agosto de 2017]
- [18] D. M. Ku: Direct displacement analysis of a stewart platform mechanism. Mechanism and Machine Theory, 34:453_465, Febrero 1997.

- [19] K. Liu, J. M. Fitzgerald y F. L. Lewis: Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 40(2):282_284, Abril 1993.
- [20] S. K. Song y D. S. Kwon: Efficient formulation approach for the forward kinematics of the 3-6 Stewart-Gough platform. En International Conference on Intelligent Robots and Systems, Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ, págs. 1688_1693, Hawaii, E.E.U.U., Noviembre 2001.
- [21] Technopedia. (n.d.). Autodesk Inventor. Obtenido de <https://www.techopedia.com/definition/24055/autodesk-inventor> [Agosto de 2017]
- [22] Stewart Platform Mechanism, (n.d.). Obtenido de <https://www.stlfinder.com/model/stewart-platform-mechanism/537664> [Agosto de 2017]
- [23] F. Gallardo. 3 de diciembre de 2015. Muere el padre de la robótica. Obtenido de <https://laruinahabitada.org/tag/robots/page/2/> [Agosto de 2017]
- [24] Festo. (n.d.). Página oficial. Obtenido de https://www.festo.com/cms/es_es/index.htm [Agosto de 2017]
- [25] Polylactic Acid (PLA, Polylactide), last updated 2017-9-3. Obtenido de <http://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide> [Agosto de 2017]
- [26] Symetrie. (n.d.). Página oficial. Obtenido de <http://www.symetrie.fr/en/home/> [Agosto de 2017]
- [27] Response Ortho. (n.d.). Smart Correction® Computer Assisted Circular Hexapod Fixator. Obtenido de <http://www.responseortho.com/products/external-fixators/smart-correction-hexapod-fixator/> [Agosto de 2017]

Anexos

Anexo I: Documentación de los productos comerciales

Anexo II: Planos de montaje

Anexo III: Planos de las piezas diseñadas

Anexo IV: Programación en Matemática

Anexo V: Programación en C++ para arduino

Anexo I: Documentación de los productos comerciales

Actuador Festo DFPI

Actuadores lineales DFPI

FESTO



Actuadores lineales DFPI

Características

Datos generales

- Actuador lineal para el accionamiento de válvulas lineales utilizadas en instalaciones de procesos continuos. Por ejemplo, válvulas de corredera y compuertas.
- Actuador lineal con sistema integrado de medición de recorrido (potenciómetro).
- Ejecuciones disponibles con regulador de posiciones integrado y bloque de válvulas (DFPI-...-C1V-...). En este caso, el regulador de posiciones integrado regula la posición del vástago a lo largo del recorrido admisible. Este actuador tiene una posición de seguridad definida en fábrica, que asume en caso de producirse un fallo de la tensión de funcionamiento o un error del valor nominal analógico. La posición definida se transmite mediante una señal analógica de valor nominal (4 ... 20 mA), por ejemplo desde un PLC/PCI industrial o se ingresa a mano localmente mediante un emisor externo de valores nominales. La información sobre la posición se obtiene mediante una señal analógica de 4 ... 20 mA. Con esta señal, el usuario puede realizar un diagnóstico más sencillo. La velocidad de los movimientos puede regularse mediante los tornillos de estrangulación integrados.
- En la ejecución con conexión -P, las conexiones eléctricas y neumáticas están protegidas muy eficientemente contra fuerzas mecánicas exteriores mediante una robusta brida.
- En el caso de la variante ND2P-E-P, el sistema de medición de recorrido emite una señal analógica, proporcional al recorrido, expresada en tensión (divisor de tensiones). Esta señal puede procesarse, por ejemplo, en un regulador externo de posiciones.

Resistentes

- Cuerpo robusto y compacto, con clase de protección IP alta
- Gracias a la gran resistencia a la corrosión, es ideal para la aplicación en el exterior
- Las ejecuciones con regulador de posiciones integrado tienen un elemento de compensación de presión que evita la formación de condensado en el interior cuando se producen oscilaciones de la temperatura, protegiendo así la parte electrónica interior

Sencillez

- Fácil integración a una arquitectura de control ya existente
- Tratándose de ejecuciones con regulador de posiciones integrado, la puesta en funcionamiento es rápida y sencilla gracias a la inicialización automática, igual que en el caso de productos sin regulador integrado

Soluciones individuales

- Ejecuciones disponibles con y sin regulador de posiciones integrado y bloque de válvulas
- En caso necesario, es posible montar detectores de posición en las ranuras con el fin de detectar binariamente posiciones adicionales

Diversidad

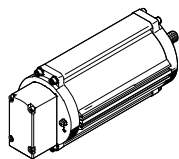
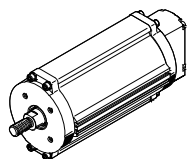
- Apropiado para la utilización en los siguientes sectores:
- Hidrotécnica
 - Técnica de tratamiento de desagües
 - Técnica de tratamiento de aguas servidas
 - Técnica de tratamiento de aguas industriales
 - Técnica de silos y productos a granel

Actuadores lineales DFPI

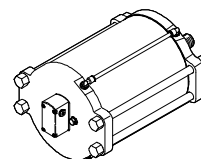
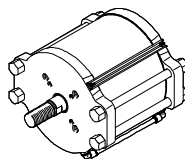
Características

Variante ND2P-E-P-G2

Diámetro del émbolo de 100 ... 160



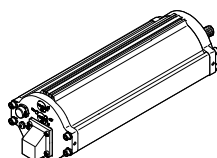
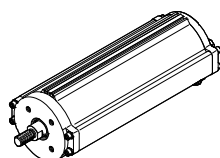
Diámetro del émbolo de 200 ... 320



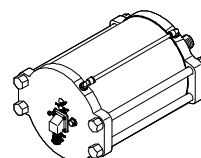
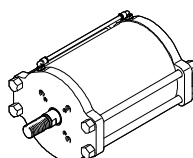
DFPI con sistema de medición de recorrido integrado, con conexiones neumáticas y eléctricas protegidas

Variante ND2P-C1V-A

Diámetro del émbolo de 100 ... 160



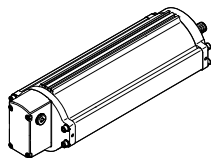
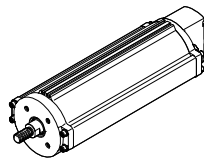
Diámetro del émbolo de 200 ... 320



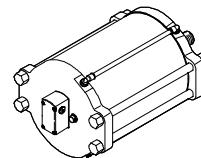
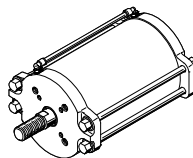
DFPI con sistema de medición de recorrido integrado, regulador de posiciones y bloque de válvulas

Variante ND2P-C1V-P-A

Diámetro del émbolo de 100 ... 160



Diámetro del émbolo de 200 ... 320

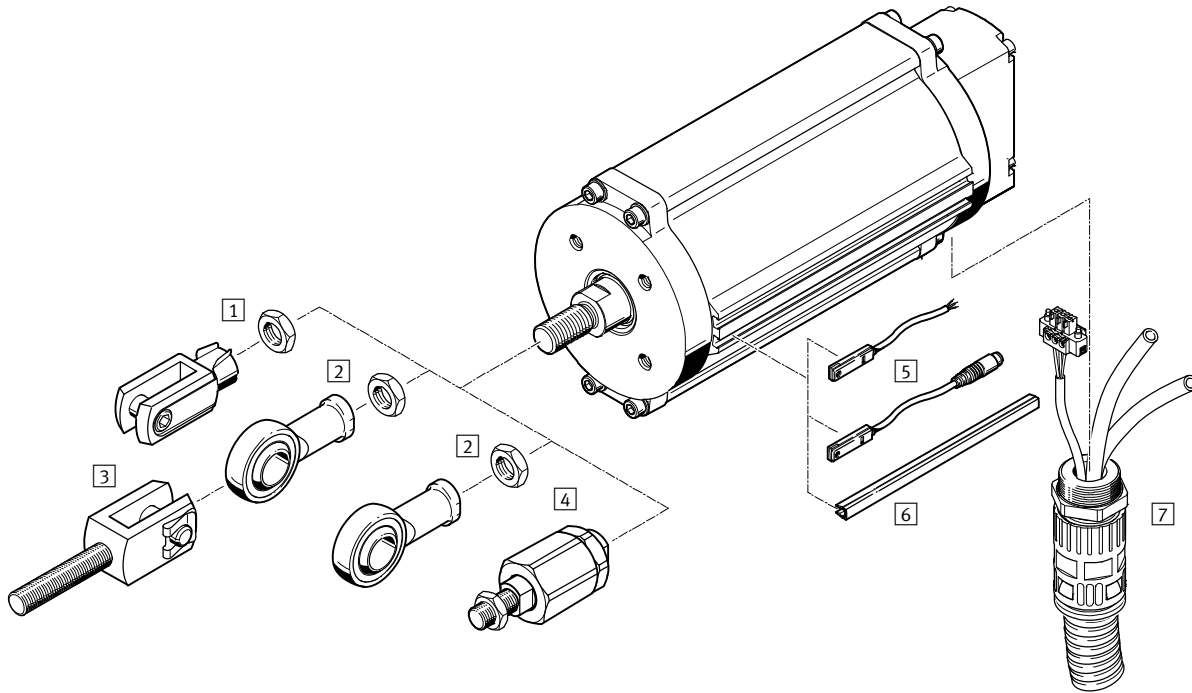


DFPI con sistema de medición de recorrido integrado, regulador de posiciones y bloque de válvulas, con conexiones neumáticas y eléctricas protegidas

Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2

Periféricos, DFPI con sistema integrado de medición de recorrido

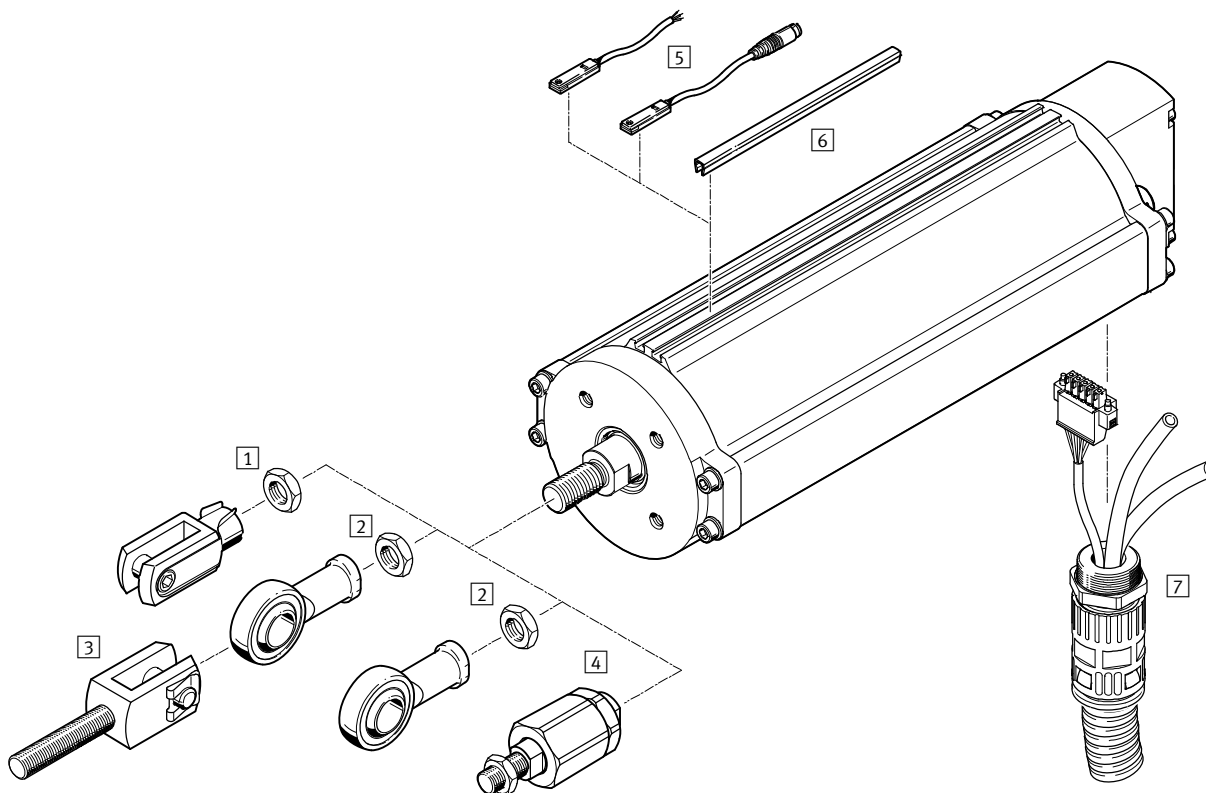
FESTO



Elementos para el montaje y accesorios			
	Descripción resumida	→ Página/Internet	
1	Horquilla SG	Permite unir de modo sencillo el vástago con la corredera	22
	Horquilla, acero inoxidable CRSG		22
2	Cabeza de rótula SGS	Con cojinete esférico	22
	Cabeza de rótula, acero inoxidable CRSGS		22
3	Horquilla SGA	Con rosca exterior	22
4	Rótula FK/CRFK	Para compensación de desviaciones radiales y angulares	22
5	Detectores de proximidad SMT-8F-I	Inductivos, Namur, de conformidad con la directiva UE, según norma 2014/34/UE (ATEX)	22
	Detectores de proximidad SMT-8	Con salida electrónica, integrables en la camisa perfilada del cilindro	22
	Detectores de proximidad SME-8	Con contacto Reed, integrables en la camisa perfilada del cilindro	23
6	Tapa para ranuras ABP-5-S	Para proteger los cables de los detectores y las ranuras frente a la suciedad	23
7	Cable de conexión NHSB	Trifilar, para DFPI- ... -ND2P-E-P	19

Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V-...-A

Periféricos, DFPI con sistema integrado de medición de recorrido, regulador de posiciones y bloque de válvulas



Elementos para el montaje y accesorios			
	Descripción resumida	→ Página/Internet	
1	Horquilla SG	Permite unir de modo sencillo el vástago con la corredera	22
	Horquilla, acero inoxidable CRSG		22
2	Cabeza de rótula SGS	Con cojinete esférico	22
	Cabeza de rótula, acero inoxidable CRSGS		22
3	Horquilla SGA	Con rosca exterior	22
4	Rótula FK	Para compensación de desviaciones radiales y angulares	22
5	Detectores de proximidad SMT-8F-I	Inductivos, Namur, de conformidad con la directiva UE, según norma 2014/34/UE (ATEX)	22
	Detectores de proximidad SMT-8	Con salida electrónica, integrables en la camisa perfilada del cilindro	22
	Detectores de proximidad SME-8	Con contacto Reed, integrables en la camisa perfilada del cilindro	23
6	Tapa para ranuras ABP-5-S	Para proteger los cables de los detectores y las ranuras frente a la suciedad	23
7	Cable de conexión NHSB	Pentafilar, para DFPI- ... -C1V	19

Actuadores lineales DFPI

Código del producto

FESTO

DFPI - 100 - 100 - N D2 P - C1 - V - P - A

Tipo	
DFPI	Actuador regulado para la tecnología de procesos

Diámetro del émbolo	
100	100 mm
125	125 mm
160	160 mm
200	200 mm
250	250 mm
320	320 mm

Carrera	
	Largo x [40 ... 990 mm]

Función	
-	Doble efecto

Amortiguación	
N	Sin amortiguación

Sistema de medición de recorrido	
D2	Analógicos

Procedimiento de medición	
P	Potenciometro

Regulación	
-	No especificado
C1	Regulador 1

Regulación de posición de montaje	
-	Integrada
E	Externa

Válvula distribuidora	
-	No especificado
V	Integrada

Ejecución de la conexión	
-	No especificado
P	Ejecución protegida

Posición de seguridad	
-	Vástago en avance

Mensaje de respuesta	
A	Retroseñal analógica

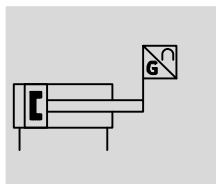
Generación	
G2	Segunda generación


Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2


FESTO


Hoja de datos

Función



-  - Carrera de
40 ... 990 mm

-  - Fuerza
4 417 ... 48 255 N

-  - Diámetro del émbolo
100 ... 320 mm



Especificaciones técnicas						
Diámetro del émbolo	100	125	160	200	250	320
Norma en la que se basa (conexión a la válvula)	DIN 3358					
Tipo de fijación	En brida según DIN 3358					
Patrón de taladros para brida	F07	F10		F10, F14		
Forma constructiva	Vástago, camisa del cilindro					
Amortiguación	No					
Posición de montaje	Indiferente					
Funcionamiento	Doble efecto					
Carrera [mm]	40 ... 990					
Carrera de reserva [mm]	3				4	
Conexión neumática	Para tubo de diámetro exterior de 8 mm					
Conexión eléctrica	Conector recto, 3 contactos, borne roscado					
Longitud máxima del cable [m]	15					
Principio de medición	Potenciómetro					
Sistema de medición del recorrido	Potenciómetro					
Detección de posiciones	Con sistema de medición de recorrido integrado					
Precisión de repetición [mm]	±0,12					
Linealidad independiente [%]	0,04					
Histéresis [mm]	0,33					
Resistencia duradera a choques según DIN/IEC 68 parte 2-82	Comprobado según clase de severidad 2					
Resistencia a vibraciones según DIN/CEI 68 parte 2-6	Comprobado según clase de severidad 2					

Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2

FESTO

Hoja de datos

Condiciones de funcionamiento y del entorno								
Diámetro del émbolo		100	125	160	200	250	320	
Presión de funcionamiento	[bar]	3 ... 8						
Presión nominal de funcionamiento	[bar]	6						
Fluido de trabajo		Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]						
Indicación sobre el fluido de funcionamiento / de pilotaje		Es posible el funcionamiento con aire comprimido lubricado (lo cual requiere seguir utilizando aire lubricado)						
Tensión de funcionamiento	[V DC]	0 ... 15						
Tensión máx. de funcionamiento	[V DC]	15						
Utilización en exteriores		C1 - Utilización en lugares protegidos contra la intemperie, según IEC 60654						
Corriente recomendada del cursor	[µA]	<0,1					-	
Corriente temporal máxima del cursor	[mA]	10					-	
Temperatura ambiente	[°C]	-20 ... +60						
Temperatura almacenamiento	[°C]	-20 ... +80						
Clase de resistencia a la corrosión ¹⁾		3						
Humedad relativa	[%]	5 ... 100, condensación						
Grado de protección		IP65, IP67, IP68, IP69K, NEMA 4						
Certificación		C-Tick					-	
Marcado CE (consultar declaración de conformidad) ➔ www.festo.com		Según directiva de protección contra explosiones de la UE (ATEX)						
ATEX, categoría gas		II 2G						
Protección contra explosiones por encendido, gas		c T4 X						
ATEX, categoría polvo		II 2D						
Protección contra explosiones por encendido, polvo		c 120°C X						
Temperatura ambiente con peligro de explosión		-20°C ≤ Ta ≤ +60°C						

1) Clase de resistencia a la corrosión CRC 3 según norma de Festo FN 940070

Alto riesgo de corrosión. Exposición a la intemperie bajo condiciones corrosivas moderadas. Piezas exteriores visibles en contacto directo con atmósferas habituales en entornos industriales y con características principalmente funcionales en la superficie.

Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2

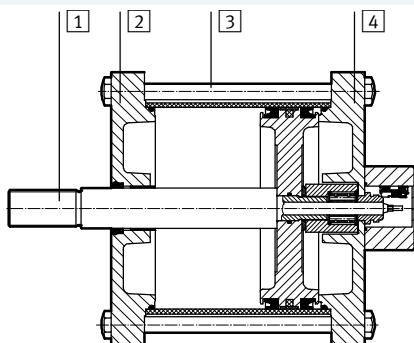
Hoja de datos

Fuerzas [N] y consumo de aire [l]						
Diámetro del émbolo	100	125	160	200	250	320
Fuerza teórica con 6 bar, avance	4712	7363	12064	18850	29452	48255
Fuerza teórica en retroceso con 6 bar	4417	6881	11581	18080	28698	47501
Consumo de aire en avance por 10 mm de carrera	0,5498	0,859	1,4074	2,119	3,4361	5,6297
Consumo de aire en retroceso por 10 mm de carrera	0,5153	0,8027	1,3511	2,111	3,3482	5,5418

Pesos						
Diámetro del émbolo	100	125	160	200	250	320
Peso máximo con carrera de 0 mm [g]	3476	5530	6529	13946	22569	35359
Peso adicional de la masa móvil por cada 10 mm de carrera [g]	27	52	52	87	87	87
Masa móvil con carrera de 0 mm [g]	1228	1944	2250	4722	7059	11417
Peso adicional por cada 10 mm de carrera [g]	80	145	159	187	325	399
Peso adicional del sistema de medición de recorrido por cada 10 mm [g]	2					

Materiales

Vista en sección



	Diámetro del émbolo	
1 Vástago	100 ... 320	Acero inoxidable de aleación fina
2 Culata inferior (culata anterior)	100 ... 320	Aleación forjada de aluminio anodizado
		Aleación forjada de aluminio anodizado, pintado
		Fundición inyectada de aluminio, pintado
3 Camisa del cilindro	100 ... 200	Aleación forjada de aluminio anodizado
	250 ... 320	Acero inoxidable de aleación fina
4 Culata superior (culata posterior)	100 ... 320	Aleación forjada de aluminio anodizado
		Aleación forjada de aluminio anodizado, pintado
		Fundición inyectada de aluminio, pintado
- Tornillos	100, 200, 250, 320	Acero inoxidable de aleación fina
	125, 160	Acero inoxidable de aleación fina
		Acero
- Tuerca	100 ... 200	Acero, recubierto
- Juntas	100	PU
	125 ... 320	NBR
- Nota sobre los materiales	100 ... 320	Contiene sustancias agresivas para la laca
		Cumple con la normativa RoHS

Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2

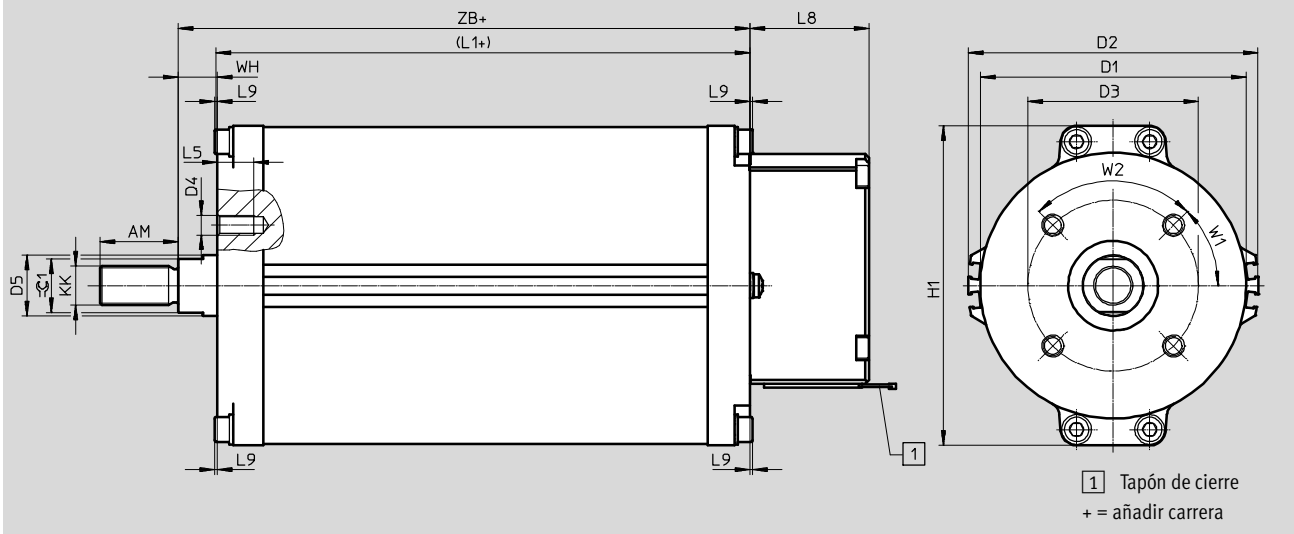


Hoja de datos

Dimensiones

Datos CAD disponibles en → www.festo.com

Diámetro del émbolo de 100 ... 160



Diámetro del émbolo [mm]	AM	D1	D2	D3	D4	D5	H1	KK	L1+
	-2	∅	∅	∅		∅			
DFPI-100	32	109	119	70	M8	25	131	M16x1,5	118,5
DFPI-125	54	135	147	102	M10	32	163	M27x2	119
DFPI-160		170	182				199		126,5

Diámetro del émbolo [mm]	L5	L8	L9	W1	W2	WH	ZB+	≈C1	Dimensiones de la brida según norma DIN 3358
DFPI-100	15	48,8	1	45°	90°	16	134,5	22	F07
DFPI-125	18	48,8	-	45°	90°	24	143	27	F10
DFPI-160							150,5		

Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2

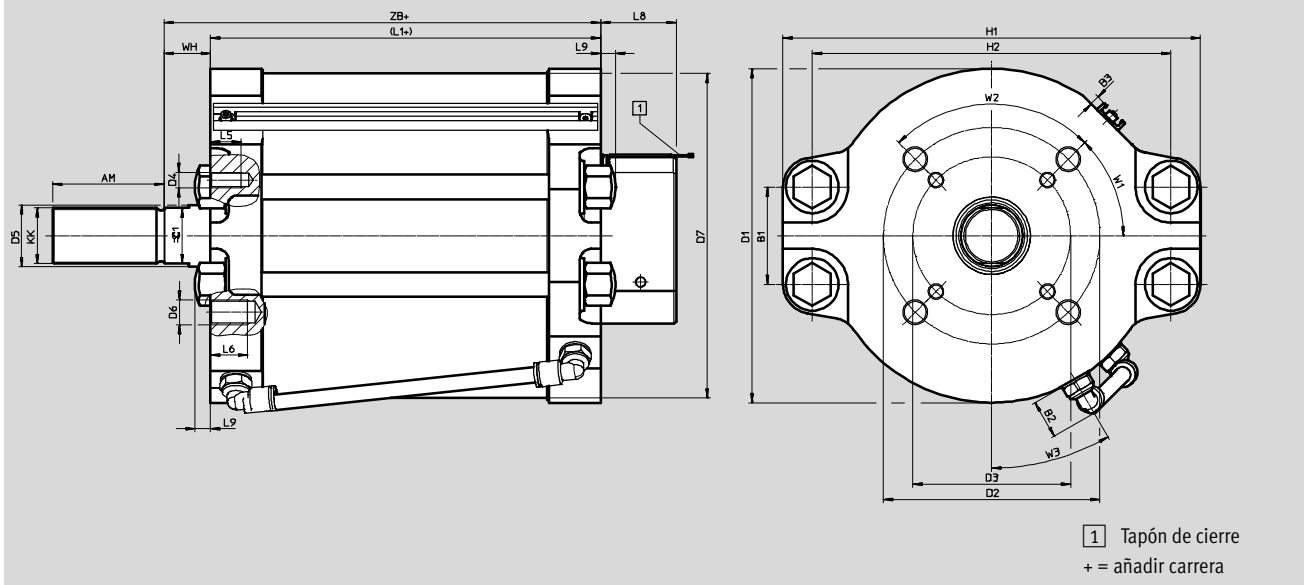
Hoja de datos



Dimensiones

Datos CAD disponibles en www.festo.com

Diámetro del émbolo de 200 ... 320

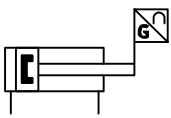


Diámetro del émbolo	AM	B1	B2	B3	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	H1	H2
[mm]	-2				∅	∅	∅		∅		∅ Mín.		
DFPI-200	72	63	25,6	6,5	216	140	102	M10	40	M16	210	270	232
DFPI-250	72	82	25,6	6,5	260	140	102	M10	40	M16	254	308	268
DFPI-320		126			332						325	378	338

Diámetro del émbolo	KK	L1+	L5	L6	L8	L9	WH	W1	W2	W3	ZB+	⊖C1	Dimensiones de la brida según norma DIN 3358
[mm]				Mín.									
DFPI-200	M36x2	152,5	20	24	48,8	10	30	45	90	30	182,5	36	F1014
DFPI-250	M36x2	152,2	20	25	48,8	25	30	45	90	30	182,2	36	F1014
DFPI-320		160		24							190		

Actuadores lineales DFPI-ND2P-E-P-G2

Hoja de datos

Referencias			
Tipo	Diámetro del émbolo [mm]	Nº art.	Tipo
	100	1808236	DFPI-100- ... -ND2P-E-P-G2
	125	1808239	DFPI-125- ... -ND2P-E-P-G2
	160	1808242	DFPI-160- ... -ND2P-E-P-G2
	200	1808245	DFPI-200- ... -ND2P-E-P-G2
	250	1808253	DFPI-250- ... -ND2P-E-P-G2
	320	1808263	DFPI-320- ... -ND2P-E-P-G2

-  - Importante

Carrera del actuador

Por regla general, la carrera del actuador debería corresponder, como mínimo, al diámetro nominal de la válvula para que ésta se pueda abrir y cerrar completamente. Las

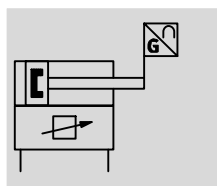
tolerancias del sistema pueden tener como consecuencia una carrera superior a la especificada como nominal. La horquilla ajustable permite ajustar el sistema.


Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V-...-A


FESTO


Hoja de datos

Función



-  - Carrera de
40 ... 990 mm

-  - Fuerza
4417 ... 48255 N

-  - Diámetro del émbolo
100 ... 320 mm



Especificaciones técnicas						
Diámetro del émbolo	100	125	160	200	250	320
Norma en la que se basa (conexión a la válvula)	DIN 3358					
Tipo de fijación	En brida según DIN 3358					
Patrón de taladros para brida	F07	F10		F10, F14		
Forma constructiva	Vástago, camisa del cilindro					
Amortiguación	Sin amortiguación					
Posición de montaje	Indiferente					
Funcionamiento	Doble efecto					
Carrera [mm]	40 ... 990					
Carrera de reserva [mm]	3				4	
Conexión neumática						
DFPI-...-ND2P-C1V-A	G1/4					
DFPI-...-ND2P-C1V-P-A	Para tubos flexibles con diámetro exterior de 8 mm, diámetro exterior de 10 mm					
Conexión eléctrica	5 contactos, conector recto, borne roscado					
Longitud máxima del cable [m]	15					
Principio de medición	Potenciómetro					
Sistema de medición del recorrido						
Detección de posiciones	Con sistema de medición de recorrido integrado					
Precisión de repetición	±1 %FS					
Precisión de posicionado	1 %FS					
Histéresis	±1 %FS					
Tamaño de la zona muerta	1 %FS					
Precisión en salida analógica	1 %FS					
Velocidad máxima al retroceder [m/s]	0,071	0,048	0,031	0,016	-	0,005
Velocidad máxima al avanzar [m/s]	0,074	0,049	0,031	0,018	-	0,007
Resistencia duradera a choques según DIN/IEC 68 parte 2-82	Comprobado según clase de severidad 2					
Resistencia a vibraciones según DIN/CEI 68 parte 2-6	Comprobado según clase de severidad 2					

Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V-...-A

Hoja de datos

Condiciones de funcionamiento y del entorno	
Presión de funcionamiento [bar]	3 ... 8
Presión nominal de funcionamiento [bar]	6
Fluido de trabajo	Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre el fluido de funcionamiento / de pilotaje	Funcionamiento posible con lubricación (de allí en adelante, obligatorio)
Tensión de funcionamiento [V DC]	21,6 ... 26,4
Tensión nom. de funcionamiento [V DC]	24
Entrada de valor nominal [mA]	4 ... 20
Salida analógica [mA]	4 ... 20
Consumo máximo de corriente [mA]	220
Protección contra polarización inversa	Sí, para la tensión de funcionamiento Para valor nominal Para conexión de inicialización
Utilización en exteriores	C1 - Utilización en lugares protegidos contra la intemperie, según IEC 60654
Temperatura ambiente [°C]	-5 ... +50
Temperatura del medio [°C]	-5 ... +40
Clase de resistencia a la corrosión ¹⁾	3
Humedad relativa [%]	5 ... 100, condensación
Grado de protección	IP65, IP67, IP68, IP69K, NEMA 4
Certificación	Marca registrada RCM
Marcado CE (consultar declaración de conformidad) → www.festo.com	Según directiva de máquinas UE EMC Según directiva de protección contra explosiones de la UE (ATEX)
ATEX, categoría gas	II 3G
Protección contra explosiones por encendido, gas	Ex nA IIC T4 X Gc
ATEX, categoría polvo	II 3D
Protección contra explosiones por encendido, polvo	Ex tc IIIC T120°C X Dc
Temperatura ambiente con peligro de explosión [°C]	-5°C ≤ Ta ≤ +50°C

1) Clase de resistencia a la corrosión CRC 3 según norma de Festo FN 940070

Alto riesgo de corrosión. Exposición a la intemperie bajo condiciones corrosivas moderadas. Piezas exteriores visibles en contacto directo con atmósferas habituales en entornos industriales y con características principalmente funcionales en la superficie.

Fuerzas [N] y consumo de aire [l]	100	125	160	200	250	320
Diámetro del émbolo						
Fuerza teórica con 6 bar, avance	4712	7363	12064	18850	29452	48255
Fuerza teórica con 6 bar en retroceso	4417	6881	11581	18080	28698	47501
Consumo de aire en retroceso por 10 mm de carrera	0,5153	0,8027	1,3511	2,111	3,3482	5,5418
Consumo de aire en avance por 10 mm de carrera	0,5498	0,859	1,4074	2,119	3,4361	5,6297

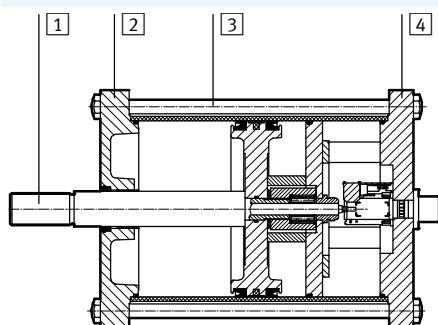
Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V-...-A

Hoja de datos

Pesos						
Diámetro del émbolo	100	125	160	200	250	320
Peso máximo con carrera de 0 mm						
DFPI-...-...-ND2P-C1V-A [g]	4671	7693	9099	18358	29956	45200
DFPI-...-...-ND2P-C1V-P-A [g]	5237	8259	9665	18924	30522	45766
Masa móvil con carrera de 0 mm [g]	1228	1944	2250	4722	7059	11417
Peso adicional por cada 10 mm de carrera [g]	80	145	159	187	325	399
Peso adicional de la masa móvil por 10 mm de carrera [g]	27	52		87		
Peso adicional del sistema de medición de recorrido por cada 10 mm [g]	2					

Materiales

Vista en sección



	Diámetro del émbolo	
1 Vástago	100 ... 320	Acero inoxidable de aleación fina
2 Culata inferior (culata anterior)	100 ... 320	Aleación forjada de aluminio anodizado
		Aleación forjada de aluminio anodizado, pintado
		Fundición inyectada de aluminio, pintado
3 Camisa del cilindro	100 ... 200	Aleación forjada de aluminio anodizado
	250 ... 320	Acero inoxidable de aleación fina
4 Culata superior (culata posterior)	100 ... 320	Aleación forjada de aluminio anodizado
		Aleación forjada de aluminio anodizado, pintado
		Fundición inyectada de aluminio, pintado
- Tornillos	100, 200, 250, 320	Acero inoxidable de aleación fina
	125, 160	Acero de aleación fina, acero inoxidable
		Acero
- Juntas	100	PU
	125 ... 320	NBR
		NBR
- Nota sobre los materiales	100 ... 320	Contiene sustancias agresivas para la laca
		Cumple con la normativa RoHS

Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V...-A

Hoja de datos

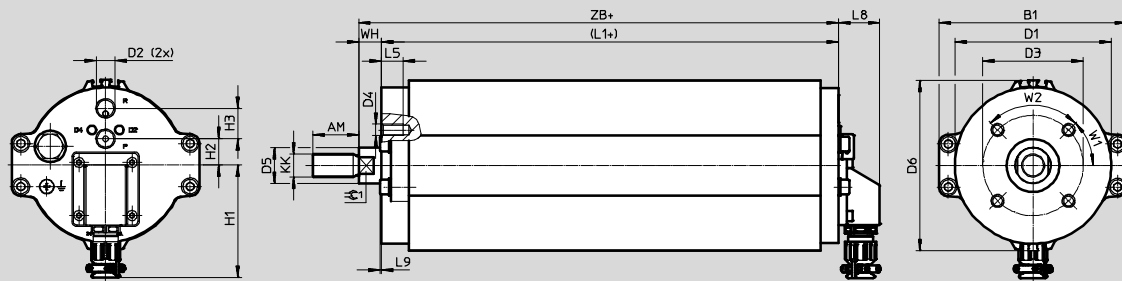
Dimensiones

Datos CAD disponibles en → www.festo.com

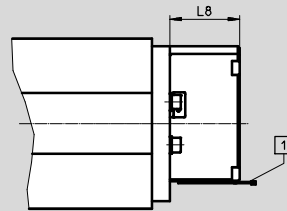
Diámetro del émbolo de 100 ... 160

Vista sin adhesivos de recubrimiento

DFPI- ... -ND2P-C1V-A



DFPI- ... -ND2P-C1V-P-A



1 Tapón de cierre
+ = añadir carrera

Diámetro del émbolo [mm]	AM -2	B1	D1 ∅	D2 ∅	D3 ∅	D4	D5 ∅	D6 ∅	H1 ±2	H2
DFPI-100- ... -C1V-A	32	131	109	G $\frac{1}{4}$	70	M8	25	119	79	18,3
DFPI-125- ... -C1V-A	54	163	135	G $\frac{1}{4}$	102	M10	32	147	79	18,3
DFPI-160- ... -C1V-A		199	170					182		

Diámetro del émbolo [mm]	H3	KK	L1+	L5	L8	L9	WH	ZB+	≅C1	Dimensiones de la brida según norma DIN 3358
DFPI-100- ... -C1V-A	21,2	M16x1,5	218,5	15	28,8	1	16	234,5	22	F07
DFPI-125- ... -C1V-A	21,2	M27x2	221	18	28,8	-	24	245	27	F10
DFPI-160- ... -C1V-A			227,5					251,5		

Diámetro del émbolo [mm]	AM -2	B1	D1 ∅	D2 ∅	D3 ∅	D4	D5 ∅	D6 ∅	H1	H2
DFPI-100- ... -C1V-P-A	32	131	109	G $\frac{1}{4}$	70	M8	25	119	-	18,3
DFPI-125- ... -C1V-P-A	54	163	135	G $\frac{1}{4}$	102	M10	32	147	-	18,3
DFPI-160- ... -C1V-P-A		199	170					182		

Diámetro del émbolo [mm]	H3	KK	L1+	L5	L8	L9	WH	ZB+	≅C1	Dimensiones de la brida según norma DIN 3358
DFPI-100- ... -C1V-P-A	21,2	M16x1,5	218,5	15	48,8	1	16	234,5	22	F07
DFPI-125- ... -C1V-P-A	21,2	M27x2	221	18	48,8	-	24	245	27	F10
DFPI-160- ... -C1V-P-A			227,5					251,5		

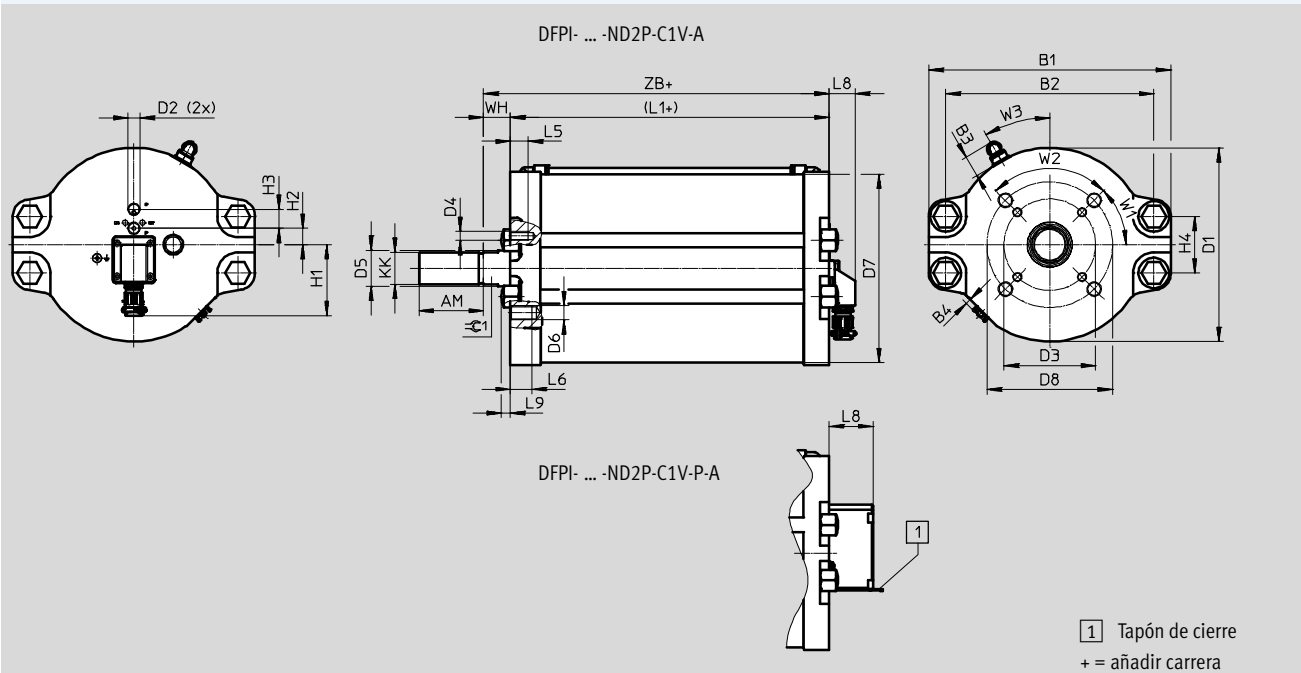
Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V-...-A

Hoja de datos

Dimensiones

Datos CAD disponibles en www.festo.com

Diámetro del émbolo de 200 ... 320



1 Tapón de cierre
+ = añadir carrera

Diámetro del émbolo [mm]	AM -2	B1	B2	B3	B4	D1 Ø	D2	D3 Ø	D4	D5 Ø	D6	D7 Ø Mín.	D8 Ø	H1 ±2	H2
DFPI-200- ... -C1V-A	72	270	232	24,5	6,5	216	G¼	102	M10	40	M16	210	140	79	18,3
DFPI-250- ... -C1V-A	72	308	268	24,5	6,5	260	G¼	102	M10	40	M16	254	140	79	18,3
DFPI-320- ... -C1V-A		378	338			332						325			

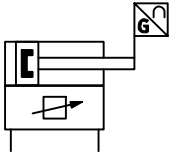
Diámetro del émbolo [mm]	H3	H4	KK	L1+	L5	L6 Mín.	L8	L9	∠C1	WH	W1	W2	W3	ZB+	Dimensiones de la brida según norma DIN 3358
DFPI-200- ... -C1V-A	21,2	63	M36x2	255,5	20	24	28,8	10	36	30	45°	90°	30°	285,5	F1014
DFPI-250- ... -C1V-A	21,2	82	M36x2	255	20	25	28,8	25	36	30	45°	90°	30°	285	F1014
DFPI-320- ... -C1V-A		126		262				-						292	

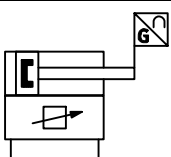
Diámetro del émbolo [mm]	AM -2	B1	B2	B3	B4	D1 Ø	D2	D3 Ø	D4	D5 Ø	D6	D7 Ø Mín.	D8 Ø	H2	H3
DFPI-200- ... -C1V-P-A	72	270	232	24,5	6,5	216	G¼	102	M10	40	M16	210	140	18,3	21,2
DFPI-250- ... -C1V-P-A	72	308	268	24,5	6,5	260	G¼	102	M10	40	M16	254	140	18,3	21,2
DFPI-320- ... -C1V-P-A		378	338			332						325			


Diámetro del émbolo [mm]	H4	KK	L1+	L5	L6 Mín.	L8	L9	∠C1	WH	W1	W2	W3	ZB+	Dimensiones de la brida según norma DIN 3358
DFPI-200- ... -C1V-P-A	63	M36x2	255,5	20	24	48,8	10	36	30	45°	90°	30°	285,5	F1014
DFPI-250- ... -C1V-P-A	82	M36x2	255	20	25	48,8	25	36	30	45°	90°	30°	285	F1014
DFPI-320- ... -C1V-P-A	126		262				-						292	

Actuadores lineales DFPI-ND2P-C1V-...-A

Hoja de datos

Referencias			
Tipo	Diámetro del émbolo [mm]	Nº art.	Tipo
	100	1548004	DFPI-100- ... -ND2P-C1V-A
	125	1548020	DFPI-125- ... -ND2P-C1V-A
	160	1548026	DFPI-160- ... -ND2P-C1V-A
	200	1548030	DFPI-200- ... -ND2P-C1V-A
	250	1548037	DFPI-250- ... -ND2P-C1V-A
	320	1548041	DFPI-320- ... -ND2P-C1V-A

Referencias			
Tipo	Diámetro del émbolo [mm]	Nº art.	Tipo
Variante con conexiones neumáticas y eléctricas protegidas			
	100	1548005	DFPI-100- ... -ND2P-C1V-P-A
	125	1548021	DFPI-125- ... -ND2P-C1V-P-A
	160	1548028	DFPI-160- ... -ND2P-C1V-P-A
	200	1548032	DFPI-200- ... -ND2P-C1V-P-A
	250	1548039	DFPI-250- ... -ND2P-C1V-P-A
	320	1548044	DFPI-320- ... -ND2P-C1V-P-A

 - Importante

Carrera del actuador

Por regla general, la carrera del actuador debería corresponder, como mínimo, al diámetro nominal de la válvula para que ésta se pueda abrir y cerrar completamente. Las tolerancias del sistema pueden tener como consecuencia una carrera superior a la especificada como nominal. Al efectuar la inicialización, el regulador de posiciones integrado memoriza la carrera utilizada y consigue que la placa avance hasta la posición deseada de manera regulada y como máximo hasta las posiciones finales memorizadas durante la inicialización.

Actuadores lineales DFPI

Accesorios

Cable NHSB
 Para DFPI-ND2P-E-P-G2 y
 DFPI-ND2P-C1V-P-A



Especificaciones técnicas			
Cable	[mm²]	3x 0,75	5x 0,75
Posición de montaje		Indistinta	
Radio de curvatura mín. del cable	[mm]	100	
Conexión neumática		Para tubo con diámetro exterior de 8 mm	
		-	Para tubo con diámetro exterior de 10 mm

Condiciones de funcionamiento y del entorno		
Temperatura ambiente	[°C]	-20 ... +60
Temperatura ambiente con cableado móvil	[°C]	-5 ... +60
Margen de tensión de funcionamiento	[V DC]	0 ... 30
Fluido de trabajo		Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Indicación sobre el fluido de funcionamiento / de pilotaje		Es posible el funcionamiento lubricado
Grado de protección		IP65, IP67, IP69K, NEMA 4 en estado montado
Uso en exteriores		C1 - lugares protegidos contra la intemperie donde se utilizará
Humedad relativa	[%]	5 ... 100, condensación

Materiales	
Tubo protector	PA
Racor de tubo flexible protector	PA
Cubierta del cable	PVC
Juntas	TPE
Características del material	Contiene sustancias agresivas para la laca
	Cumple con la normativa RoHS

Actuadores lineales DFPI

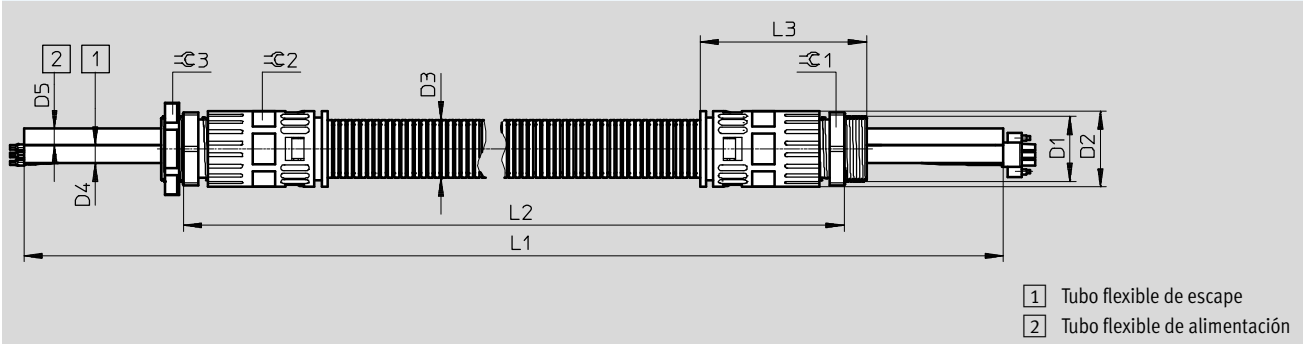
Accesorios

FESTO

Dimensiones

Datos CAD disponibles en www.festo.com

Trifilar

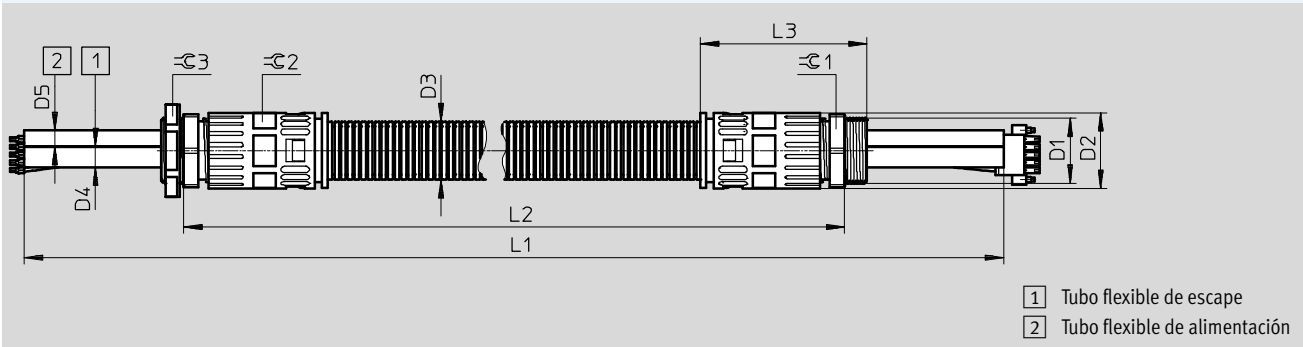


Tipo	D1	D2 Ø	D3 Ø	D4 Ø	D5 Ø	L1 ±25	L2 ±25	L3	⊖ C1	⊖ C2	⊖ C3
NHSB-A1-5-BLG3-LE3-PU8-2xBB	M32x1,5	37	28,5	8	8	6 100	5 000	82	36	34	41
NHSB-A1-10-BLG3-LE3-PU8-2xBB						11100	10000				
NHSB-A1-15-BLG3-LE3-PU8-2xBB						16100	15000				

Dimensiones

Datos CAD disponibles en www.festo.com

Pentaflar





Tipo	D1	D2 Ø	D3 Ø	D4 Ø	D5 Ø	L1 ±25	L2 ±25	L3	⊖ C1	⊖ C2	⊖ C3
NHSB-A1-5-BLG5-LE5-PU8-2xBB	M32x1,5	37	28,5	10	8	6 100	5 000	82	36	34	41
NHSB-A1-10-BLG5-LE5-PU8-2xBB						11100	10000				
NHSB-A1-15-BLG5-LE5-PU8-2xBB						16100	15000				

Actuadores lineales DFPI

Accesorios





FESTO




Referencias – Cables							Hojas de datos → Internet: nhsb	
	Conexión eléctrica 1	Conexión eléctrica 2	Largo [m]	Tipo de cable [mm ²]	Peso del producto [g]	Nº art.	Tipo	
Trifilar, para DFPI- ... -ND2P-E-P								
	Conector recto tipo clavija, 3 contactos	Extremo libre, cable trifilar	5	3x 0,75	1250	1686608	NHSB-A1-5-BLG3-LE3-PU8-2XBB	
			10		2500	1686609	NHSB-A1-10-BLG3-LE3-PU8-2XBB	
			15		3750	1686610	NHSB-A1-15-BLG3-LE3-PU8-2XBB	
Pentafilar, para DFPI- ... -C1V-P								
	Conector recto tipo clavija, 5 contactos	Extremo libre, 5 contactos	5	5x 0,75	1250	1585793	NHSB-A1-5-BLG5-LE5-PU8-2XBB	
			10		2500	1585794	NHSB-A1-10-BLG5-LE5-PU8-2XBB	
			15		3750	1585795	NHSB-A1-15-BLG5-LE5-PU8-2XBB	


Actuadores lineales DFPI


Accesorios


FESTO

Referencias – Acoplamiento para vástagos				Hojas de datos → Internet: acoplamiento para vástagos			
Denominación	Para diámetro	Nº art.	Tipo	Denominación	Para diámetro	Nº art.	Tipo
Cabeza de rótula SGS				Horquilla SG			
	100	9263	SGS-M16x1,5		100	6146	SG-M16x1,5
	125, 160	10774	SGS-M27x2		125, 160	14987	SG-M27x2-B
	200, 250, 320	10775	SGS-M36x2		200, 250, 320	9581	SG-M36x2
Horquilla SGA				Rótula FK			
	100	10768	SGA-M16x1,5		100	6142	FK-M16x1,5
	125, 160	10770	SGA-M27x2		125, 160	10485	FK-M27x2
	200, 250, 320	10771	SGA-M36x2		200, 250, 320	10746	FK-M36x2

Referencias – Cabezales para vástagos, ejecución anticorrosiva				Hojas de datos → Internet: acoplamiento para vástagos			
Denominación	Para diámetro	Nº art.	Tipo	Denominación	Para diámetro	Nº art.	Tipo
Horquilla CRSG				Cabeza de rótula CRSGS			
	100	13571	CRSG-M16x1,5		100	195584	CRSGS-M16x1,5
	125, 160	185361	CRSG-M27x2		125, 160	195586	CRSGS-M27x2
Rótula CRFK							
	100	2490673	CRFK-M16x1,5				

Referencias – Detectores de posición para ranura en T				Hojas de datos → Internet: smt-8f		
	Salida de conexión	Conexión eléctrica		Longitud del cable [m]	Nº art.	Tipo
	Namur	Cable bifilar		5,0	536956	SMT-8F-I-8,2V-K5,0-OE-EX



Referencias – Detectores de posición para ranura en T, magnetorresistivo					Hojas de datos → Internet: smt-8	
	Salida de conexión	Conexión eléctrica		Longitud del cable [m]	Nº art.	Tipo
		Cable	Conector tipo clavija M8x1			
Detector normalmente abierto						
	PNP	Trifilar	–	2,5	574335	SMT-8M-A-PS-24V-E-2,5-OE
			3 contactos	5,0	574336	SMT-8M-A-PS-24V-E-5,0-OE
	NPN	Trifilar	–	0,3	574334	SMT-8M-A-PS-24V-E-0,3-M8D
			3 contactos	2,5	574338	SMT-8M-A-PS-24V-E-2,5-OE
			0,3	574339	SMT-8M-A-PS-24V-E-0,3-M8D	





Referencias – Detectores de posición para ranura en T				Hojas de datos → Internet: crsmt		
	Salida de conexión	Conexión eléctrica		Longitud del cable [m]	Nº art.	Tipo
Detector normalmente abierto						
	PNP	Cable trifilar		2,5	525563	CRSMT-8-PS-K2,5-LED-24
				5,0	525564	CRSMT-8-PS-K5-LED-24


Actuadores lineales DFPI

Accesorios

FESTO

Referencias – Detectores para ranura en T, magnético Reed				Hojas de datos → Internet: sme	
Técnica de conexión		Cable con conector M8x1	Longitud del cable [m]	Nº art.	Tipo
Cable					
Detector normalmente abierto					
	Margen de tensión de funcionamiento 0 ... 30 V AC/DC				
	Trifilar	–	2,5	150855	SME-8-K-LED-24
			5,0	175404	SME-8-K5-LED-24
			7,5	530491	SME-8-K-7,5-LED-24
	–	3 contactos	0,3	150857	SME-8-S-LED-24
	Bifilar	–	2,5	171169	SME-8-ZS-KL-LED-24
	Termorresistente hasta 120 °C				
Bifilar	–	2,5	161756	SME-8-K-24-S6	
Margen de tensión de funcionamiento 3 ... 250 V AC/DC					
Bifilar	–	2,5	152820	SME-8-K-LED-230	
Detector normalmente cerrado					
	Trifilar	–	7,5	160251	SME-8-O-K-LED-24

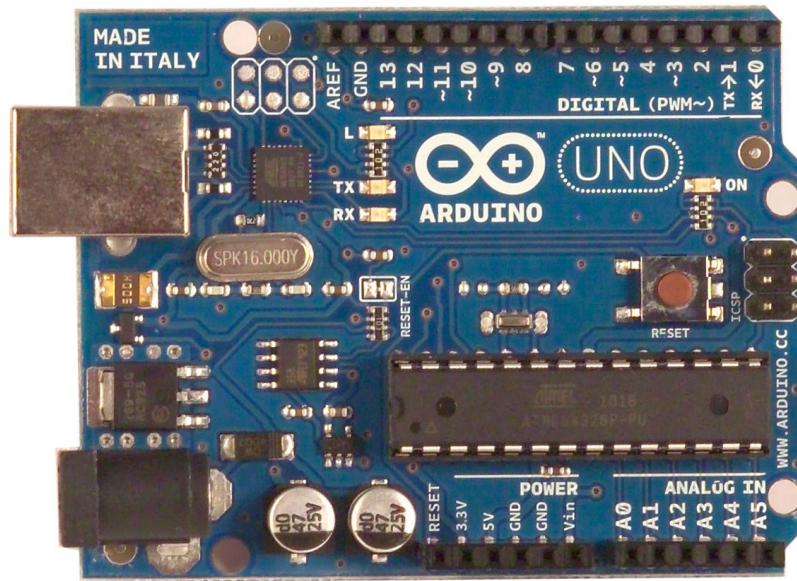
Referencias – Cable de conexión M8x1				Hojas de datos → Internet: nebu					
Conexión eléctrica en el lado izquierdo		Conexión eléctrica en el lado derecho	Salida de conexión	Longitud del cable [m]	Nº art.	Tipo			
Tipo básico									
	Conector tipo zócalo M8x1, 3 contactos		Cable trifilar, extremo abierto		–				
							2,5	541333	NEBU-M8G3-K-2.5-LE3
							5	541334	NEBU-M8G3-K-5-LE3
	Conector acodado tipo zócalo M8x1, 3 contactos		Cable trifilar, extremo abierto		–				
							10	541332	NEBU-M8G3-K-10-LE3
							2,5	541338	NEBU-M8W3-K-2.5-LE3
	Conector acodado tipo zócalo M8x1, 3 contactos		Cable trifilar, extremo abierto		PNP				
							5	541340	NEBU-M8W5P-K-5-LE3
							2,5	541336	NEBU-M8W5N-K-2.5-LE3
	Conector acodado tipo zócalo M8x1, 3 contactos		Cable trifilar, extremo abierto		NPN				
							5	541339	NEBU-M8W5N-K-5-LE3

Referencias – Tapa para ranura en T				
Montaje		Largo [m]	Nº art.	Tipo
	Enchufable	2x 0,5	151680	ABP-5-S

Referencias – Clip para cables SMBK-8				
			Nº art.	Tipo
	Para la fijación del cable en la ranura para detectores		534254	SMBK-8

Placa Arduino Uno

Arduino UNO



Product Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the [index of Arduino boards](#).

Index

Technical Specifications

Page 2

How to use Arduino
Programming Environment, Basic Tutorials

Page 6

Terms & Conditions

Page 7

Environmental Policies
half sqm of green via Impatto Zero®

Page 7



radiospares

RADIONICS



Technical Specification

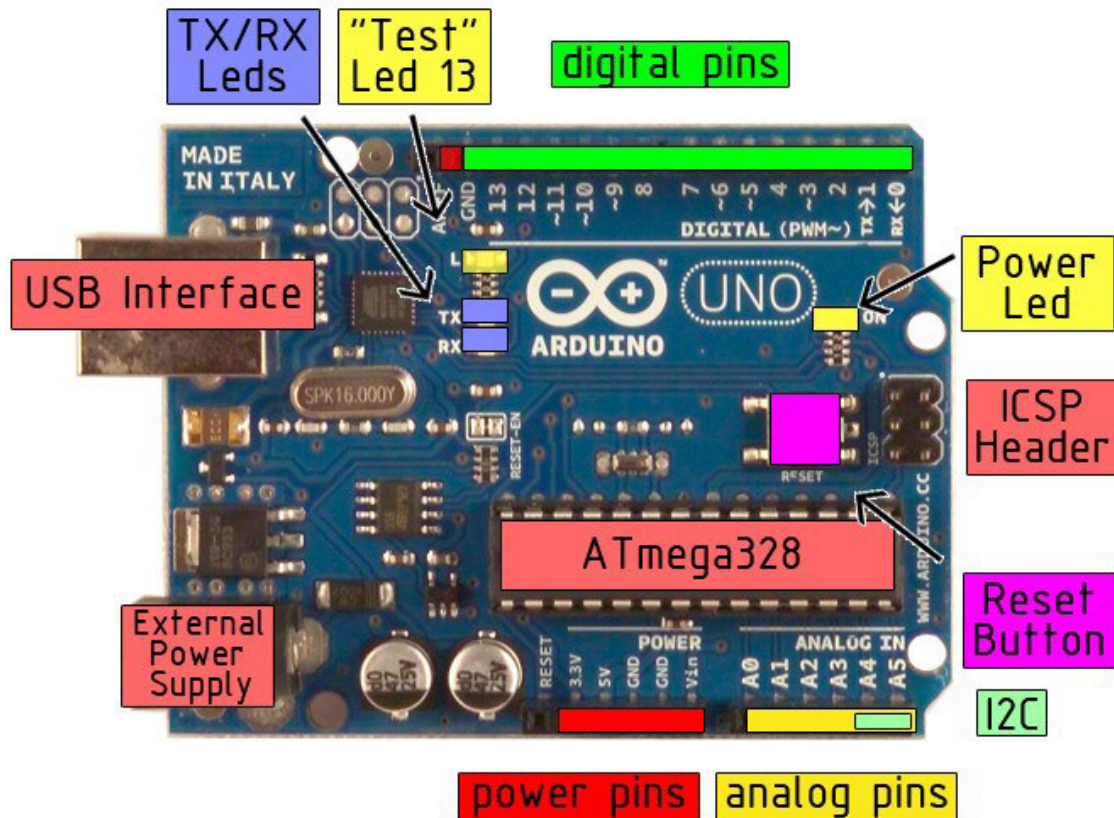


EAGLE files: [arduino-duemilanove-uno-design.zip](#) Schematic: [arduino-uno-schematic.pdf](#)

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

the board



radiospares

RADIONICS



Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Memory

The Atmega328 has 32 KB of flash memory for storing code (of which 0,5 KB is used for the bootloader); It has also 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip .
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication, which, although provided by the underlying hardware, is not currently included in the Arduino language.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.



radiospares

RADIONICS



The Uno has 6 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **I²C: 4 (SDA) and 5 (SCL).** Support I²C (TWI) communication using the [Wire library](#).

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and Atmega328 ports](#).

Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega8U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '8U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, on Windows, an *.inf file is required..

The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Uno's digital pins.

The ATmega328 also support I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the [documentation](#) for details. To use the SPI communication, please see the ATmega328 datasheet.

Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Uno w/ ATmega328" from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega8U2 firmware source code is available . The ATmega8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2. You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader).



RADIOSPARES

RADIONICS



Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Uno is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload.

This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

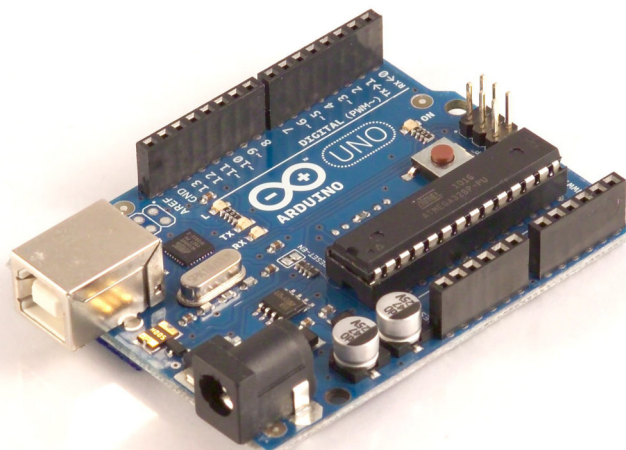
The Uno contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

USB Overcurrent Protection

The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

Physical Characteristics

The maximum length and width of the Uno PCB are 2.7 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Three screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.



RADIOSPARES

RADIONICS



How to use Arduino



Arduino can sense the environment by receiving input from a variety of sensors and can affect its surroundings by controlling lights, motors, and other actuators. The microcontroller on the board is programmed using the [Arduino programming language](#) (based on [Wiring](#)) and the Arduino development environment (based on [Processing](#)). Arduino projects can be stand-alone or they can communicate with software on running on a computer (e.g. Flash, Processing, MaxMSP).

Arduino is a cross-platform program. You'll have to follow different instructions for your personal OS. Check on the [Arduino site](http://arduino.cc/en/Guide/HomePage) for the latest instructions. <http://arduino.cc/en/Guide/HomePage>

Linux Install

Windows Install

Mac Install

Once you have downloaded/unzipped the arduino IDE, you can Plug the Arduino to your PC via USB cable.

Blink led

Now you're actually ready to "burn" your first program on the arduino board. To select "blink led", the physical translation of the well known programming "hello world", select

**File>Sketchbook>
Arduino-0017>Examples>
Digital>Blink**

Once you have your sketch you'll see something very close to the screenshot on the right.

In **Tools>Board** select

Now you have to go to **Tools>SerialPort** and select the right serial port, the one arduino is attached to.

```
int ledPin = 13; // LED connected to digital pin 13

// The setup() method runs once, when the sketch starts

void setup() {
  // initialize the digital pin as an output:
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
}

// the loop() method runs over and over again,
// as long as the Arduino has power

void loop()
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH); // set the LED on
  delay(1000);                // wait for a second
  digitalWrite(ledPin, LOW);  // set the LED off
  delay(1000);                // wait for a second
}
```

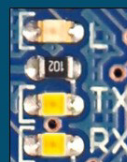


Done compiling.

Press Compile button
(to check for errors)



Upload



TX RX Flashing



Blinking Led!

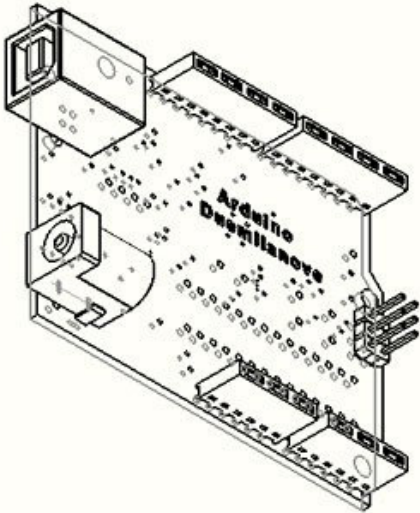
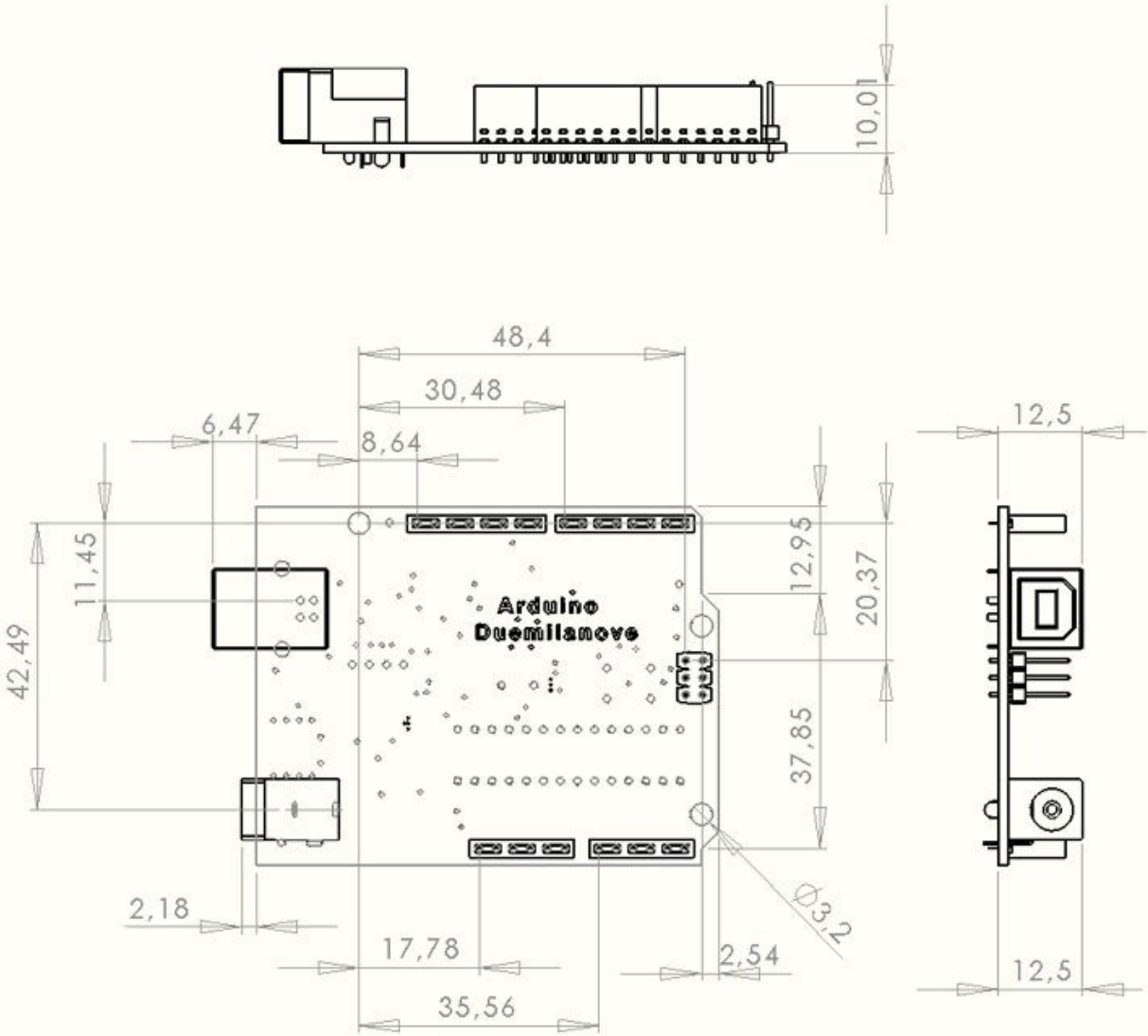


radiospares

RADIONICS



Dimensioned Drawing



radiospares

RADIONICS



Terms & Conditions



1. Warranties

1.1 The producer warrants that its products will conform to the Specifications. This warranty lasts for one (1) years from the date of the sale. The producer shall not be liable for any defects that are caused by neglect, misuse or mistreatment by the Customer, including improper installation or testing, or for any products that have been altered or modified in any way by a Customer. Moreover, The producer shall not be liable for any defects that result from Customer's design, specifications or instructions for such products. Testing and other quality control techniques are used to the extent the producer deems necessary.

1.2 If any products fail to conform to the warranty set forth above, the producer's sole liability shall be to replace such products. The producer's liability shall be limited to products that are determined by the producer not to conform to such warranty. If the producer elects to replace such products, the producer shall have a reasonable time to replacements. Replaced products shall be warranted for a new full warranty period.

1.3 EXCEPT AS SET FORTH ABOVE, PRODUCTS ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS." THE PRODUCER DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE

1.4 Customer agrees that prior to using any systems that include the producer products, Customer will test such systems and the functionality of the products as used in such systems. The producer may provide technical, applications or design advice, quality characterization, reliability data or other services. Customer acknowledges and agrees that providing these services shall not expand or otherwise alter the producer's warranties, as set forth above, and no additional obligations or liabilities shall arise from the producer providing such services.

1.5 The Arduino™ products are not authorized for use in safety-critical applications where a failure of the product would reasonably be expected to cause severe personal injury or death. Safety-Critical Applications include, without limitation, life support devices and systems, equipment or systems for the operation of nuclear facilities and weapons systems. Arduino™ products are neither designed nor intended for use in military or aerospace applications or environments and for automotive applications or environment. Customer acknowledges and agrees that any such use of Arduino™ products which is solely at the Customer's risk, and that Customer is solely responsible for compliance with all legal and regulatory requirements in connection with such use.

1.6 Customer acknowledges and agrees that it is solely responsible for compliance with all legal, regulatory and safety-related requirements concerning its products and any use of Arduino™ products in Customer's applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by the producer.

2. Indemnification

The Customer acknowledges and agrees to defend, indemnify and hold harmless the producer from and against any and all third-party losses, damages, liabilities and expenses it incurs to the extent directly caused by: (i) an actual breach by a Customer of the representation and warranties made under this terms and conditions or (ii) the gross negligence or willful misconduct by the Customer.

3. Consequential Damages Waiver

In no event the producer shall be liable to the Customer or any third parties for any special, collateral, indirect, punitive, incidental, consequential or exemplary damages in connection with or arising out of the products provided hereunder, regardless of whether the producer has been advised of the possibility of such damages. This section will survive the termination of the warranty period.

4. Changes to specifications

The producer may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." The producer reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.



Environmental Policies



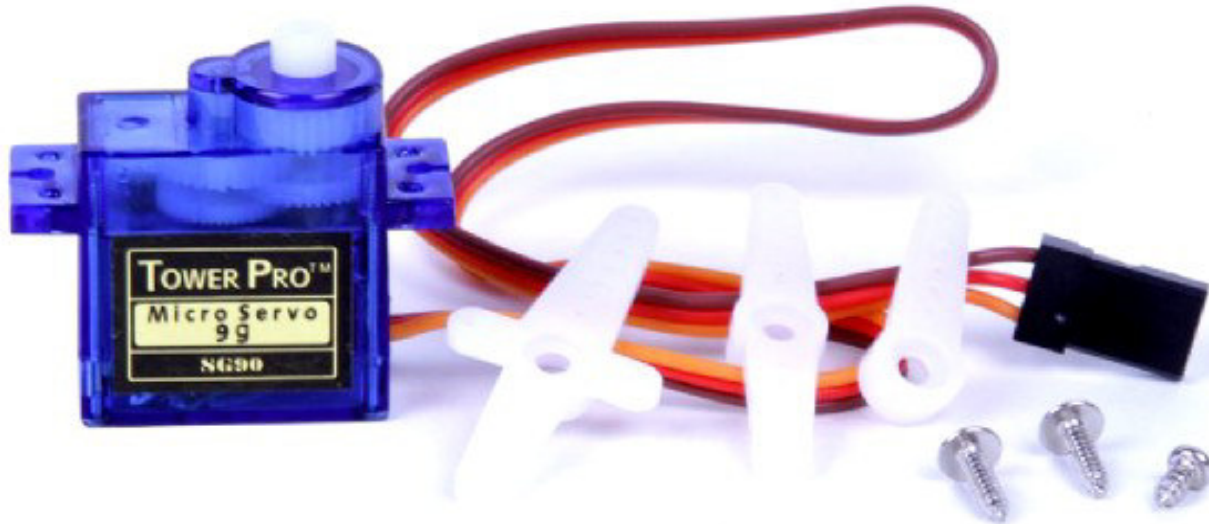
The producer of Arduino™ has joined the Impatto Zero® policy of LifeGate.it. For each Arduino board produced is created / looked after half squared Km of Costa Rica's forest's.



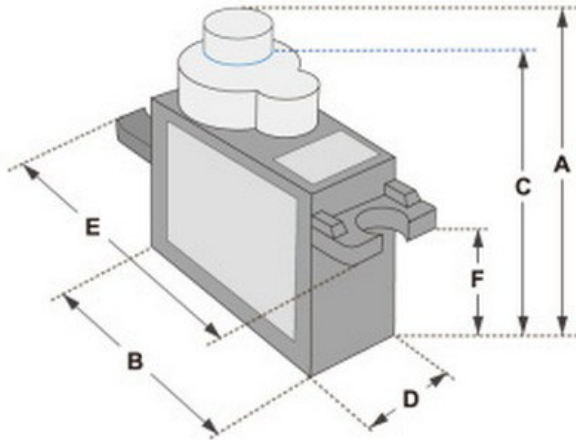
radiospares **RADIONICS**



Microservo 9g

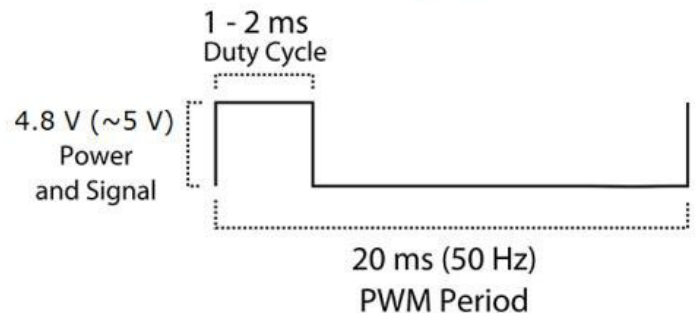


Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but smaller. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.



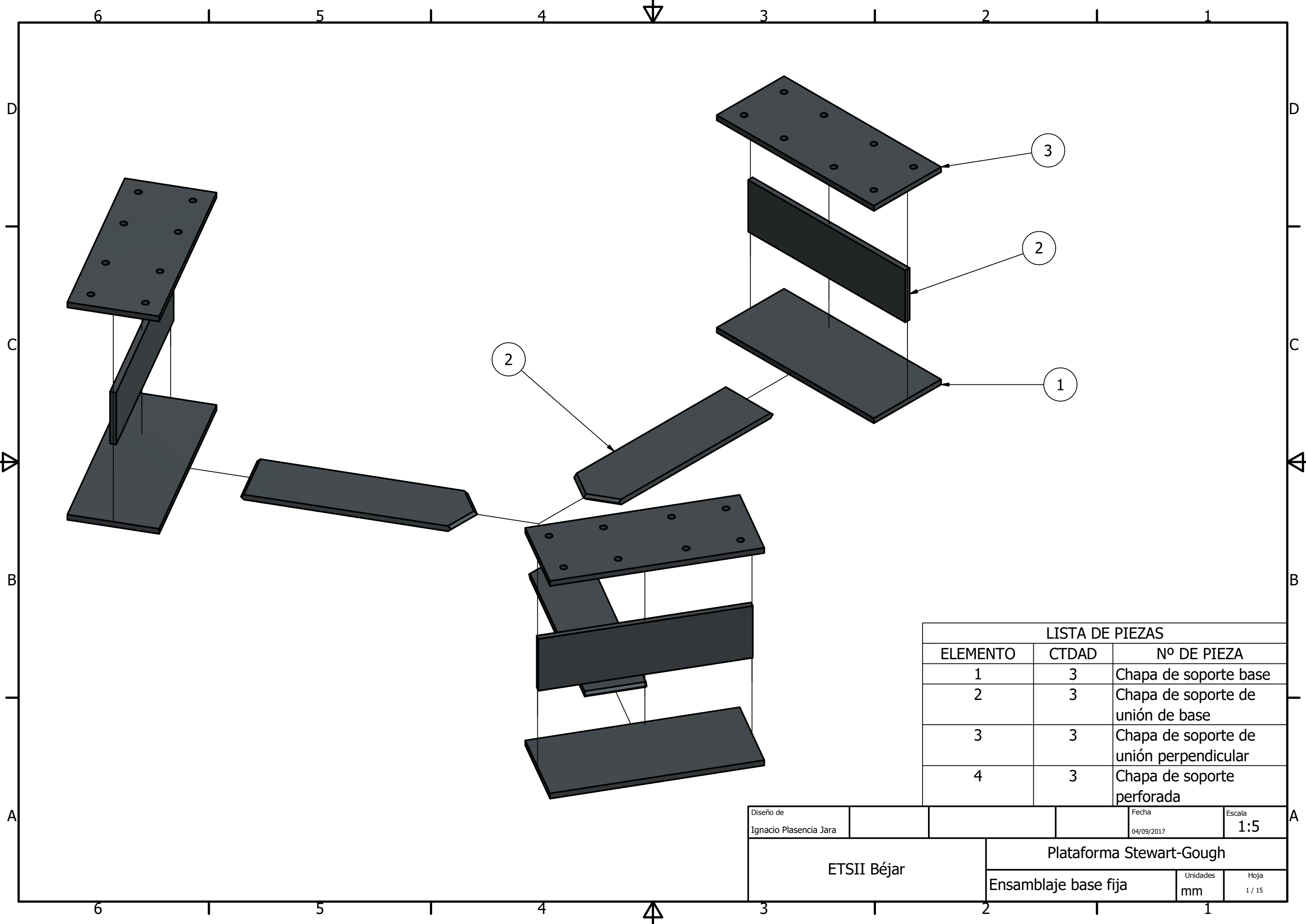
Dimensions & Specifications	
A (mm) :	32
B (mm) :	23
C (mm) :	28.5
D (mm) :	12
E (mm) :	32
F (mm) :	19.5
Speed (sec) :	0.1
Torque (kg-cm) :	2.5
Weight (g) :	14.7
Voltage :	4.8 - 6

Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2ms pulse) is middle, is all the way to the right, "-90" (~1ms pulse) is all the way to the left.



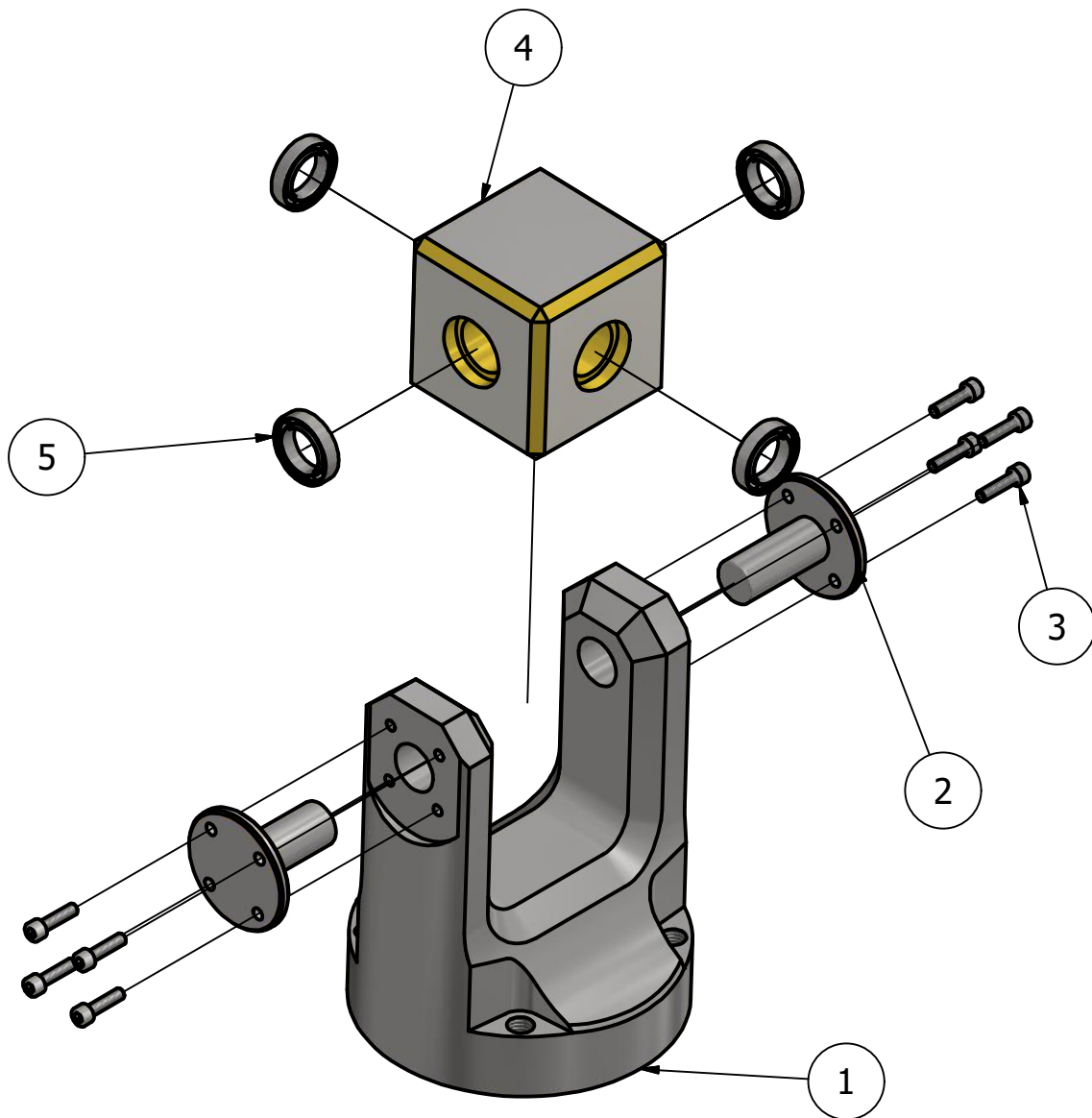
Anexo II: Planos de montaje

Montaje del robot simulado



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	3	Chapa de soporte base
2	3	Chapa de soporte de unión de base
3	3	Chapa de soporte de unión perpendicular
4	3	Chapa de soporte perforada

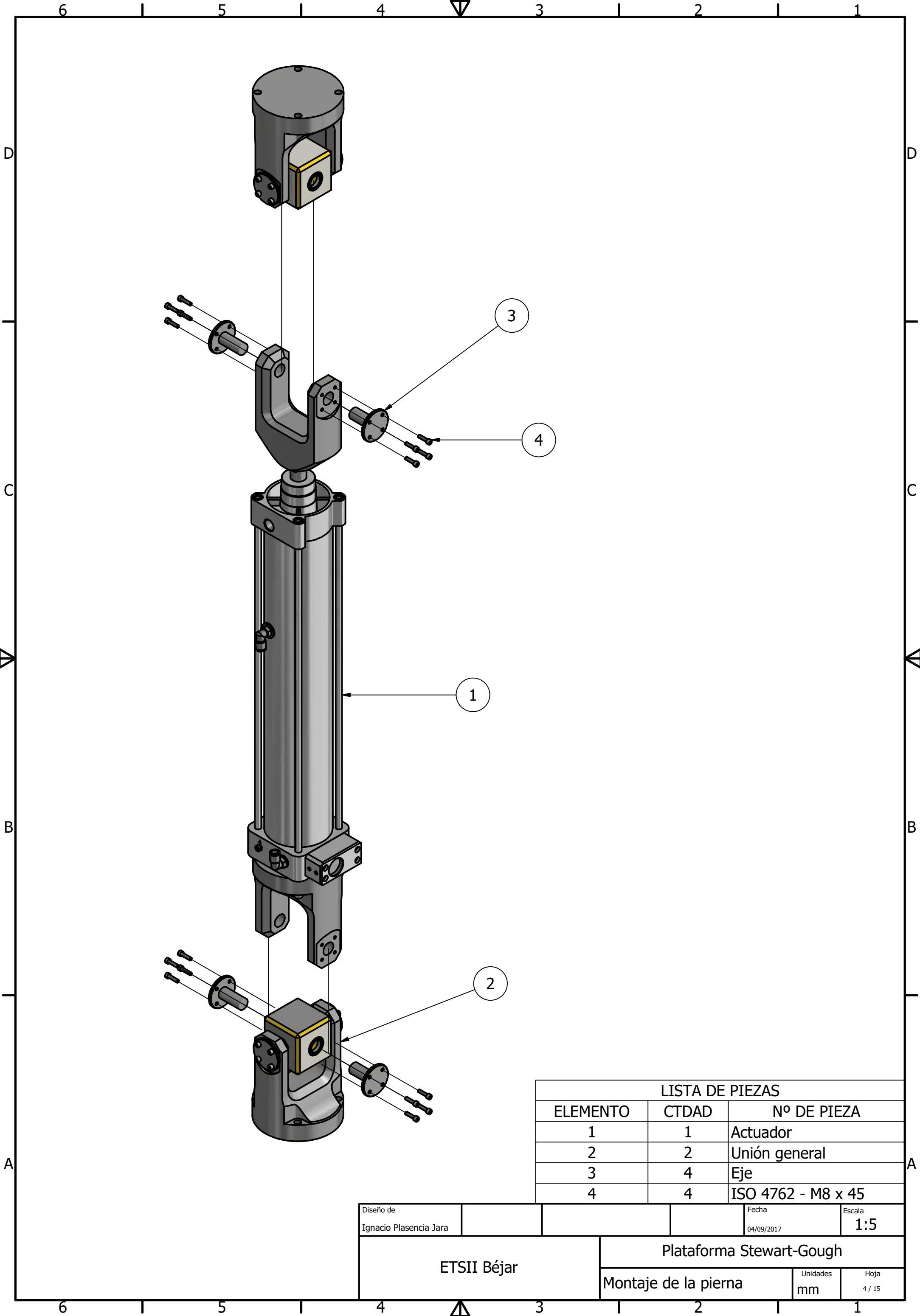
Diseño de Ignacio Plasencia Jara			Fecha 04/09/2017	Escala 1:5
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
Ensamblaje base fija		Unidades mm	Hoja 1 / 15	



LISTA DE PIEZAS

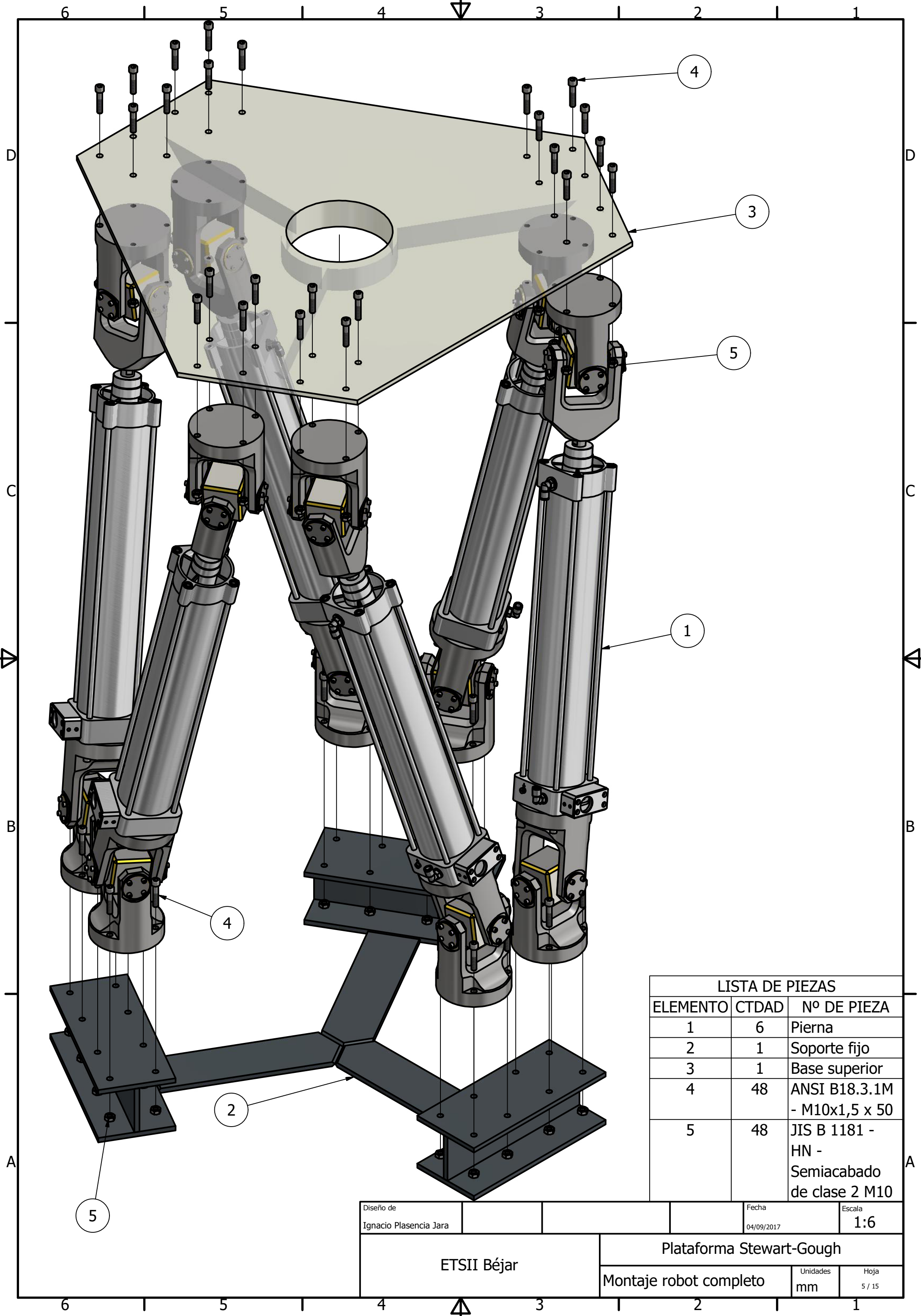
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Cabezal A
2	2	Eje
3	8	ANSI B18.3.1M - M5x0,8 x 20
5	4	ANSI/AFBMA 16.1 - 20 x 32 x 7
4	1	Unión universal

Diseño de Ignacio Plasencia Jara			Fecha 04/09/2017	Escala 1:3
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Montaje de la unión genera	Unidades mm	Hoja 2 / 15



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Actuador
2	2	Unión general
3	4	Eje
4	4	ISO 4762 - M8 x 45

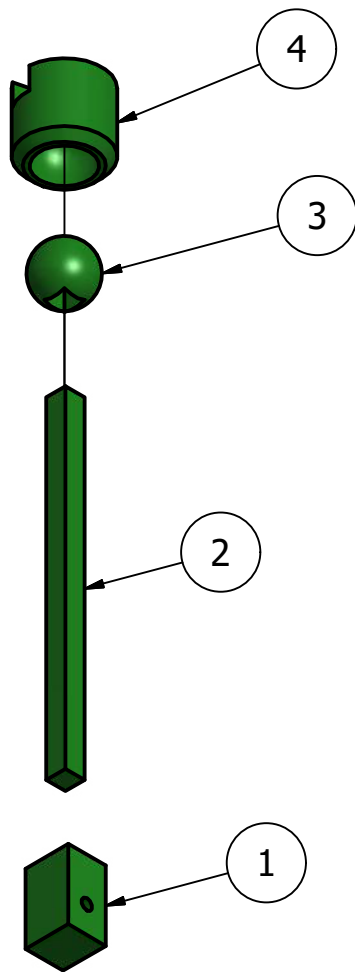
Diseño de Ignacio Plasencia Jara			Fecha 04/09/2017	Escala 1:5
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Montaje de la pierna	Unidades mm	Hoja 4 / 15



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	6	Pierna
2	1	Soporte fijo
3	1	Base superior
4	48	ANSI B18.3.1M - M10x1,5 x 50
5	48	JIS B 1181 - HN - Semiacabado de clase 2 M10

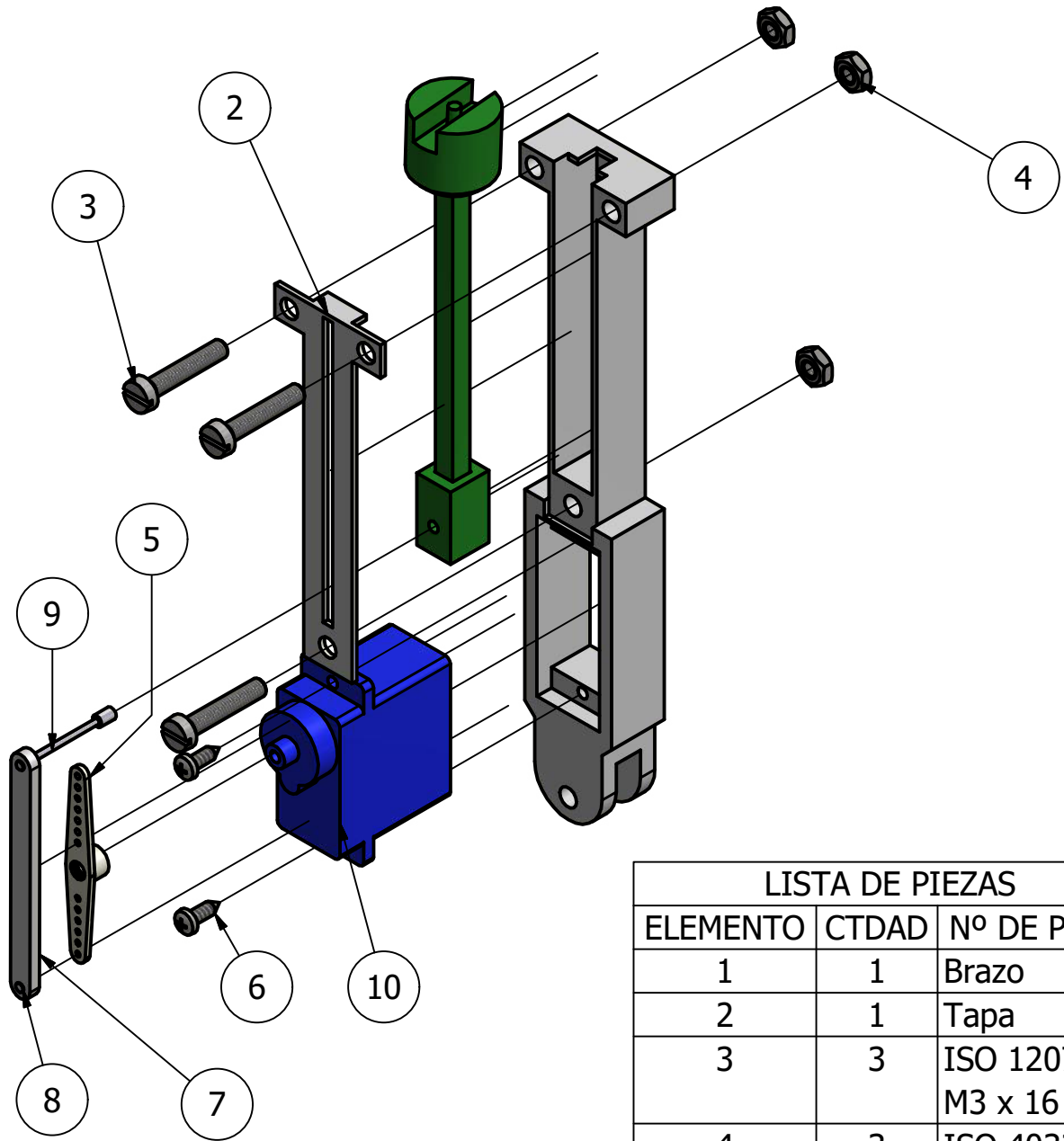
Diseño de Ignacio Plasencia Jara	Fecha 04/09/2017	Escala 1:6
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough
Montaje robot completo		Unidades mm
		Hoja 5 / 15

Montaje de la maqueta



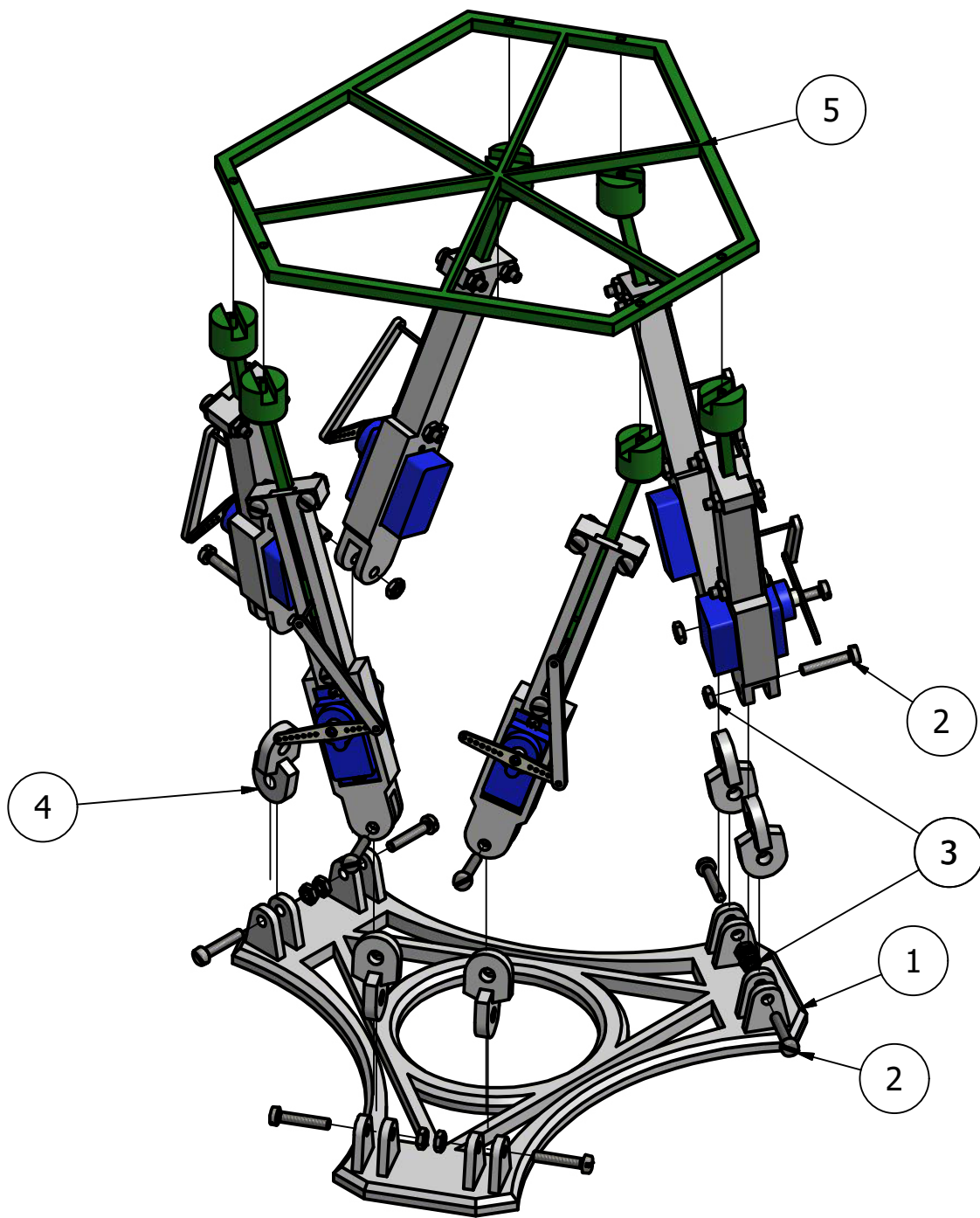
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Émbolo	
2	1	Vástago	
3	1	Esfera	
4	1	Rotula	

Diseño de Ignacio Plasencia Jara			Fecha 03/09/2017	Escala 1:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Montaje vástago	Unidades mm	Hoja 1 / 13



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Brazo
2	1	Tapa
3	3	ISO 1207 - M3 x 16
4	3	ISO 4032 - M3
5	1	Brazo microservo
6	2	JIS B 1122 - ST2,2 x 6,5 - C - H
7	1	Pieza1
8	1	Unión 1
9	1	Unión 2
10	1	Microservo9g

Diseño de Ignacio Plasencia Jara			Fecha 03/09/2017	Escala 1:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Montaje pierna	Unidades mm	Hoja 2 / 13



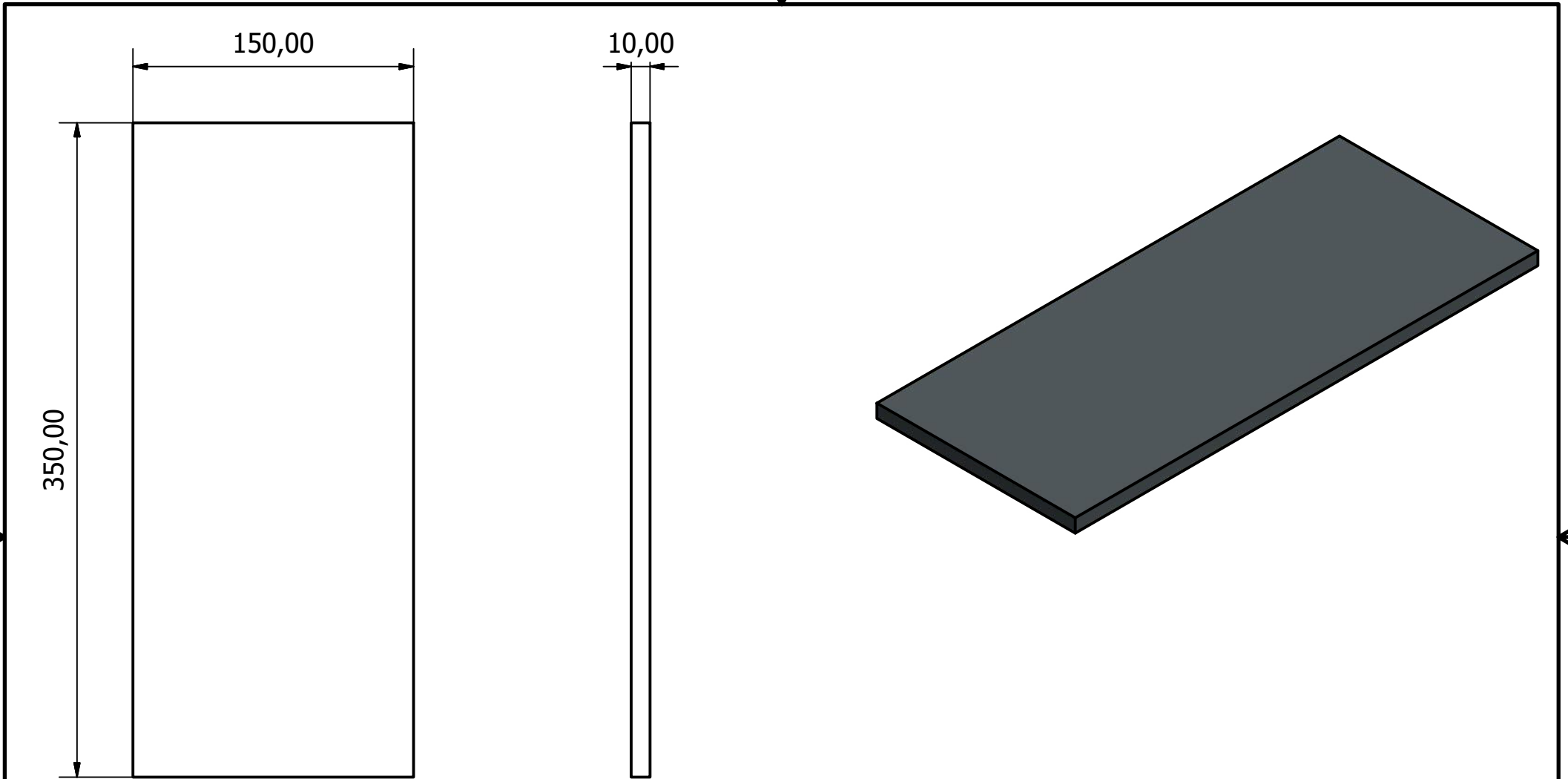
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	base maqueta
2	30	ISO 1207 - M3 x 16
3	30	ISO 4032 - M3
4	6	union
5	1	parte superior

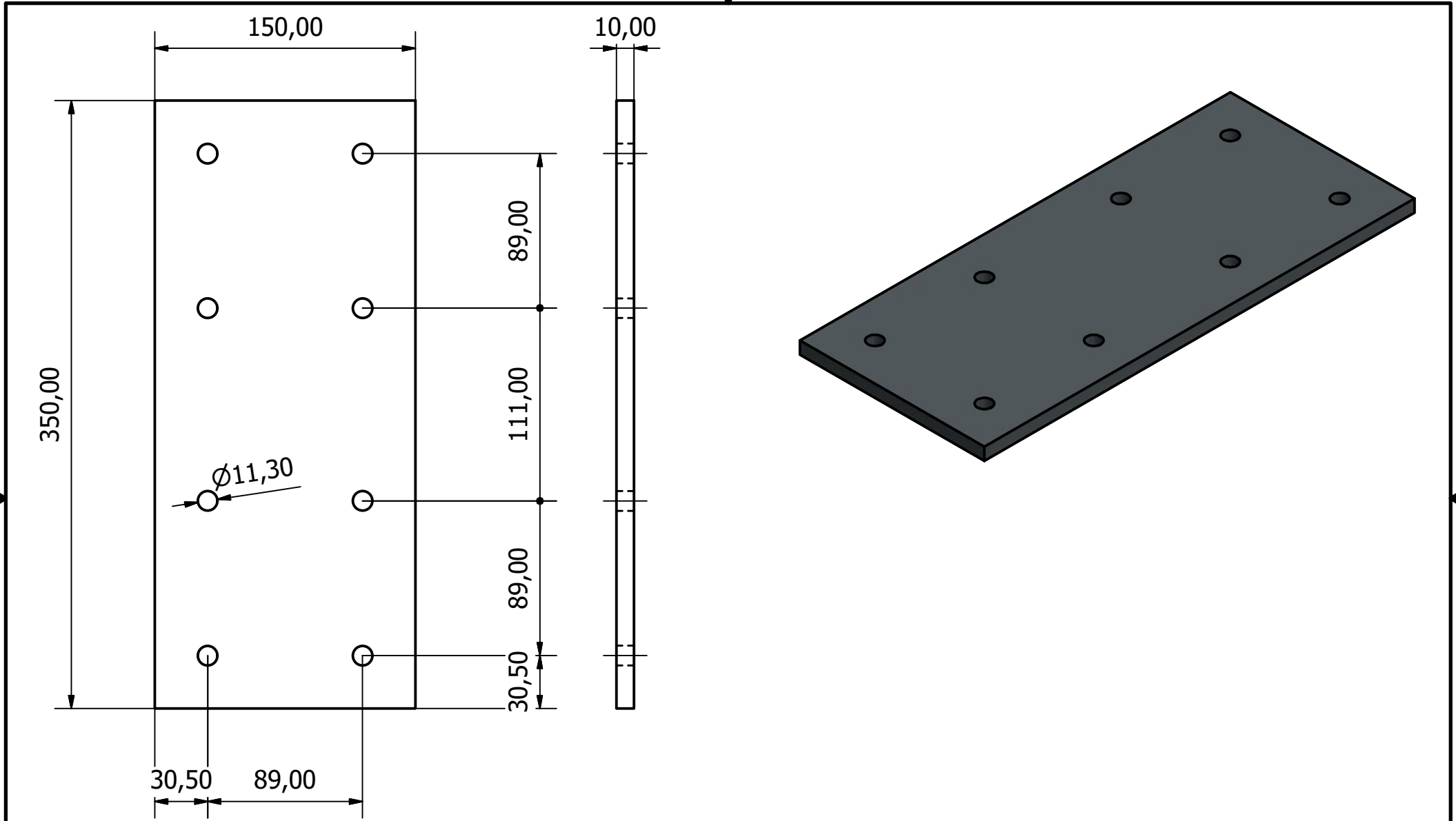
Diseño de Ignacio Plasencia Jara			Fecha 03/09/2017	Escala 1:2
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Montaje maqueta	Unidades mm	Hoja 3 / 13

Anexo III: Planos de las piezas diseñadas

Piezas de la simulación



Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:3
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Chapa de soporte base	Unidades mm	Hoja 6 / 15



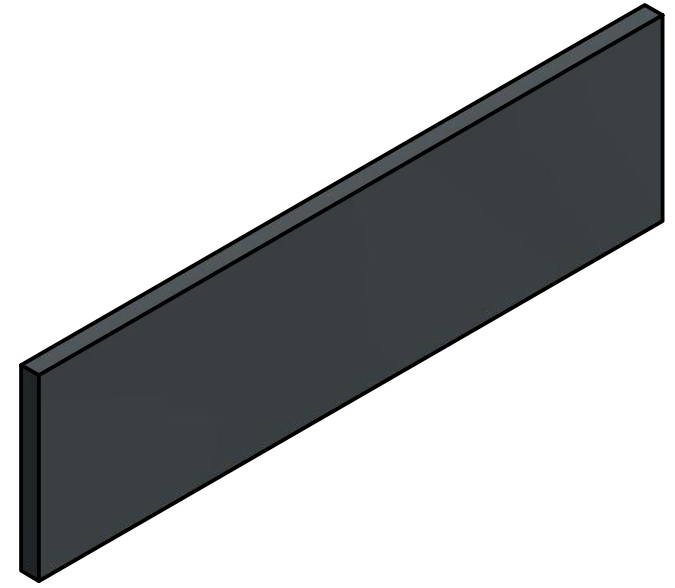
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:3
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Chapa de soporte perforada	Unidades mm	Hoja 7 / 15





350,00

100,00

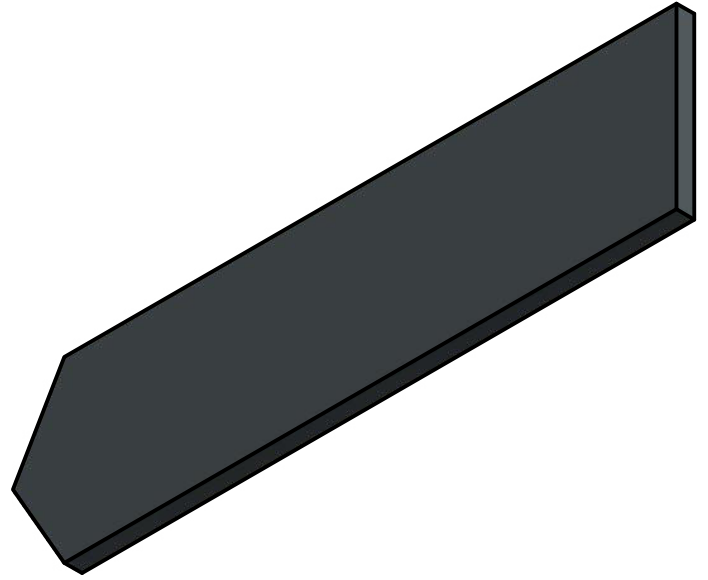
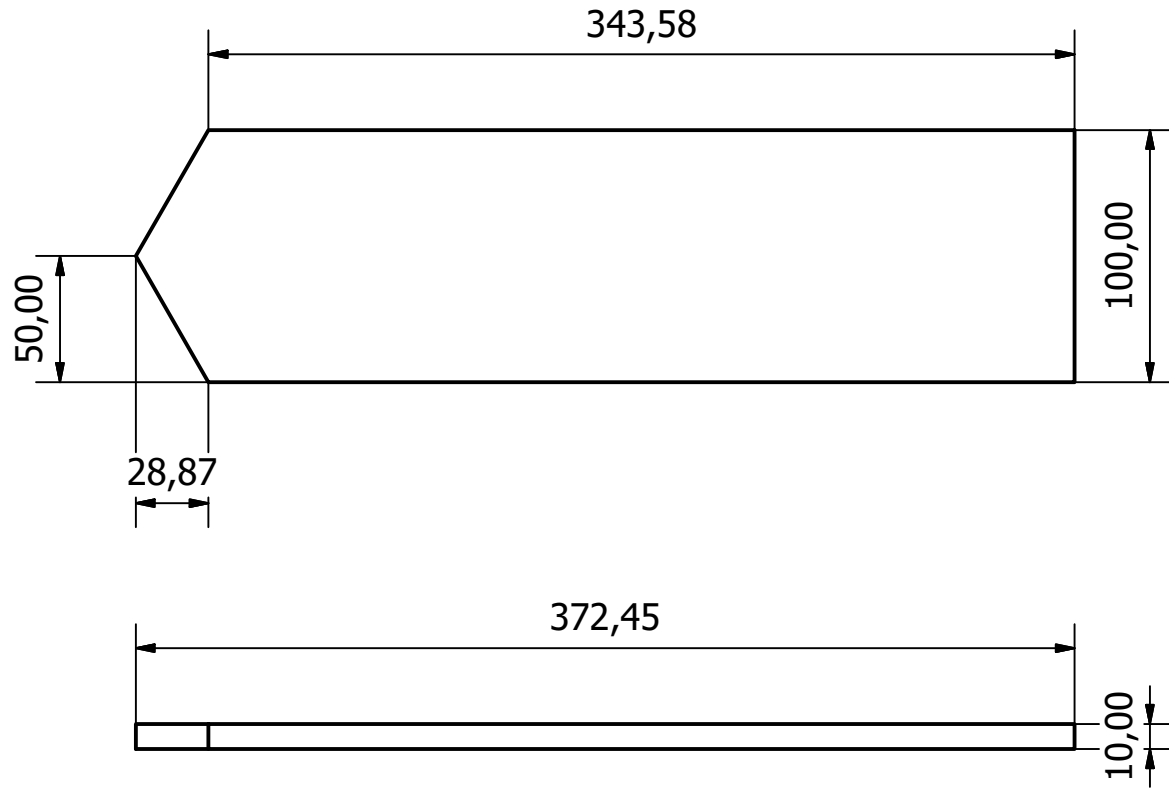


10,00

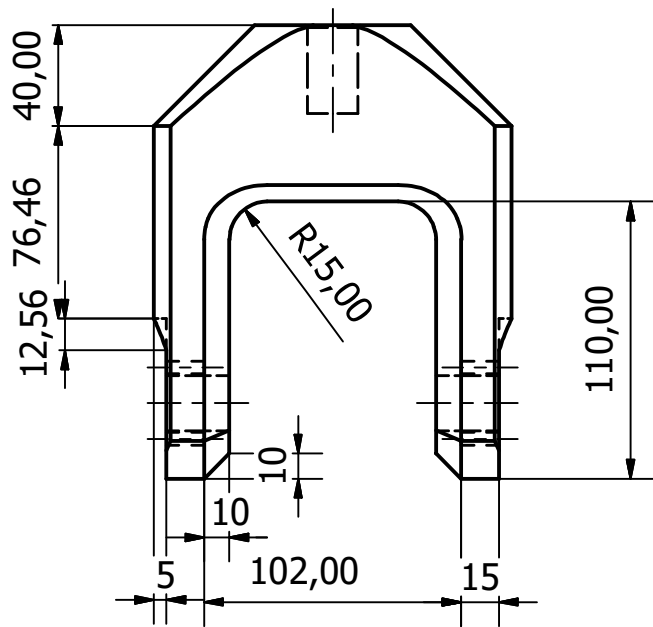
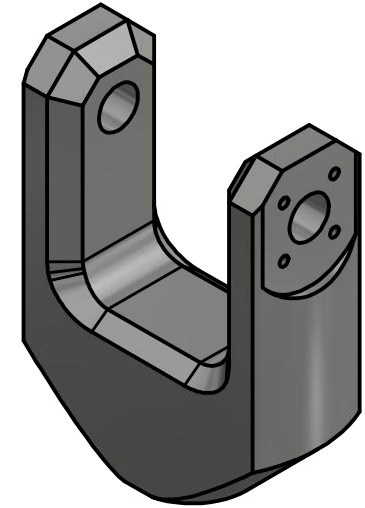
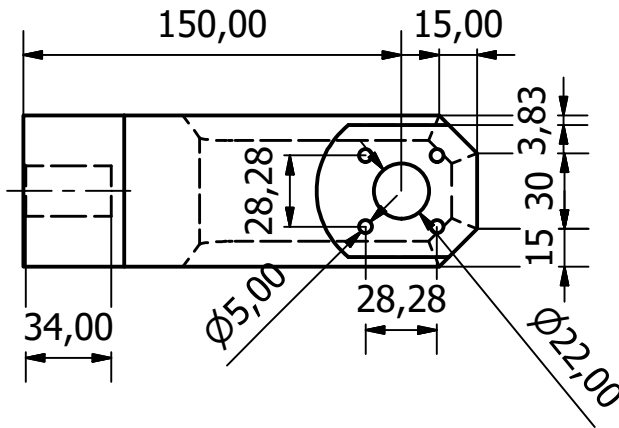
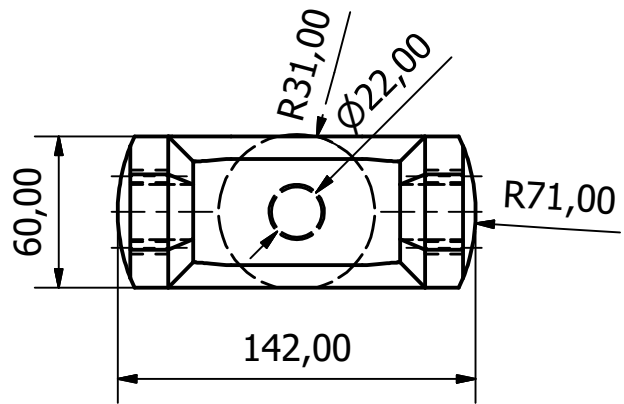


Diseño de				Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara				04/09/2017	1:3
ETSII Béjar			Plataforma Stewart-Gough		
			Chapa de unión perpend.	Unidades mm	Hoja 9 / 15

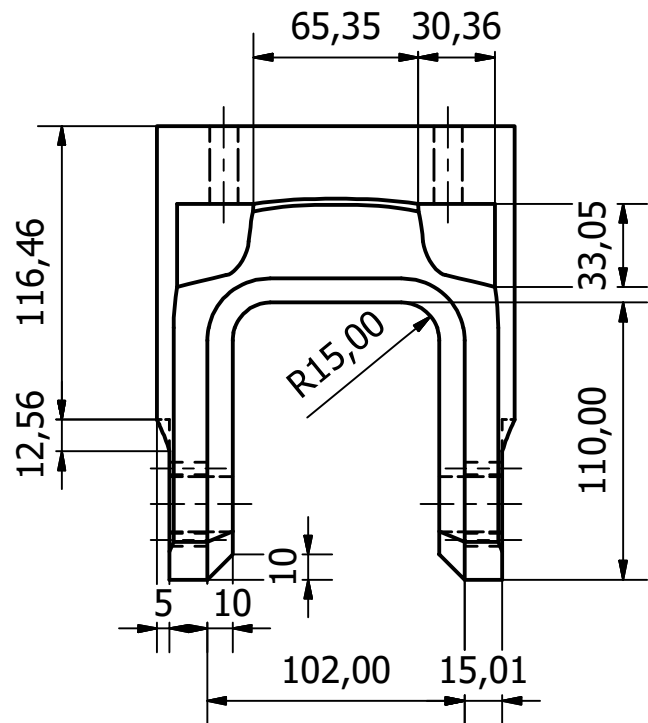
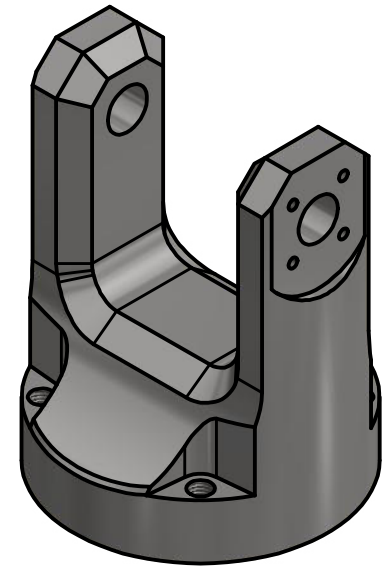
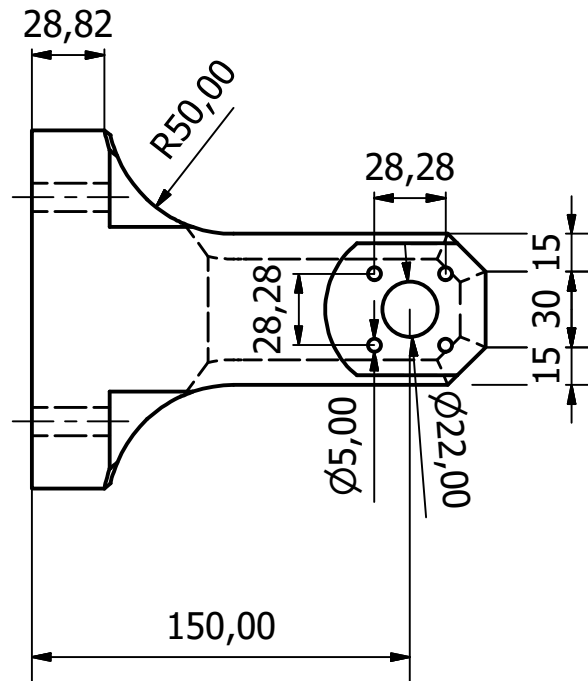
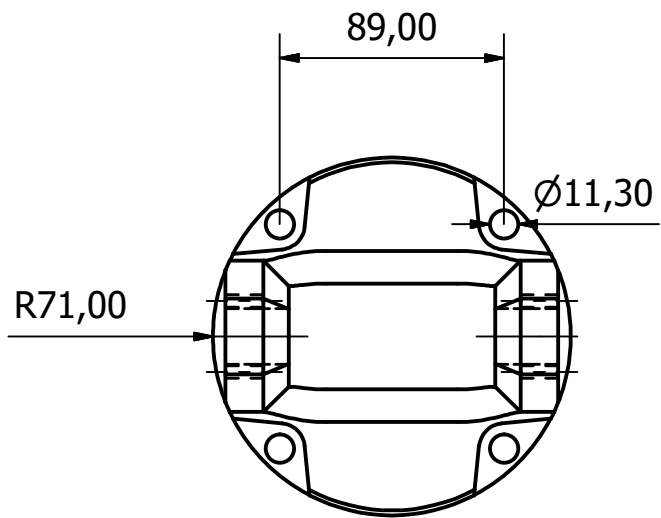




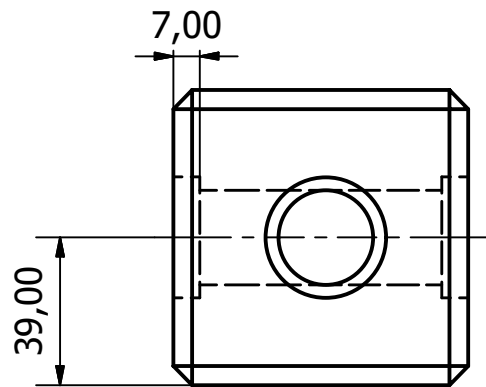
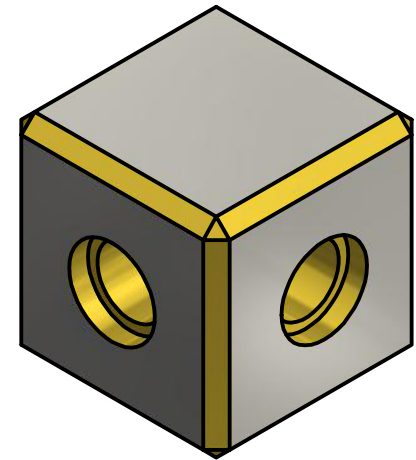
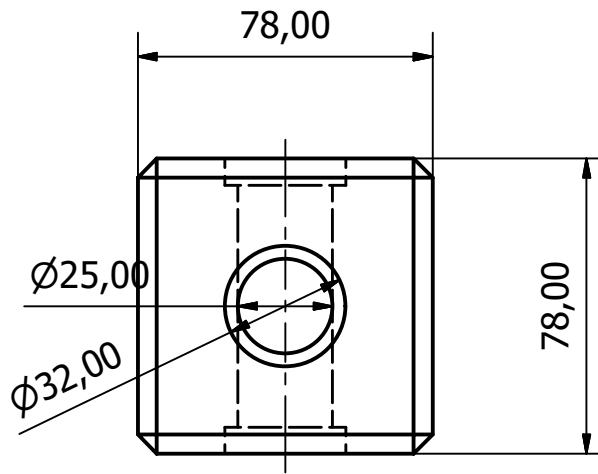
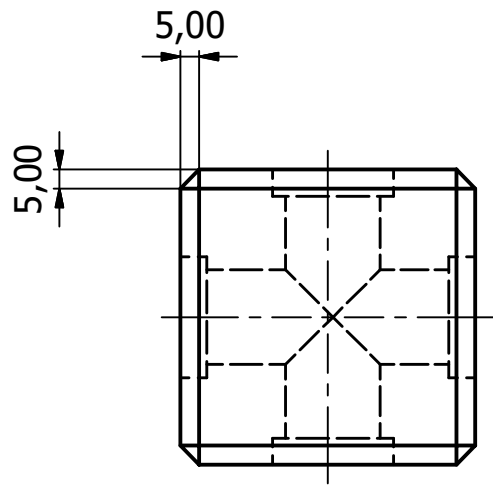
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:3
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Chapa de unión base	Unidades mm	Hoja 8 / 15



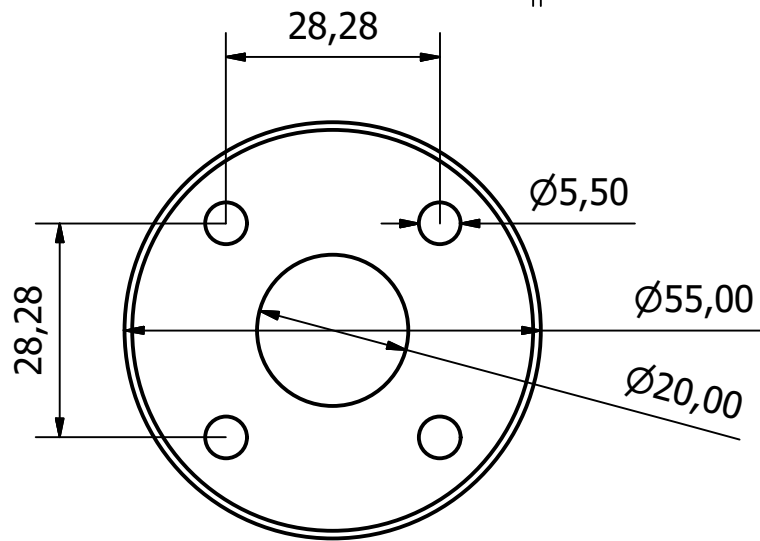
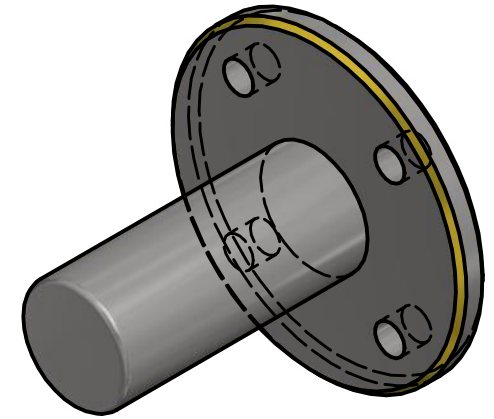
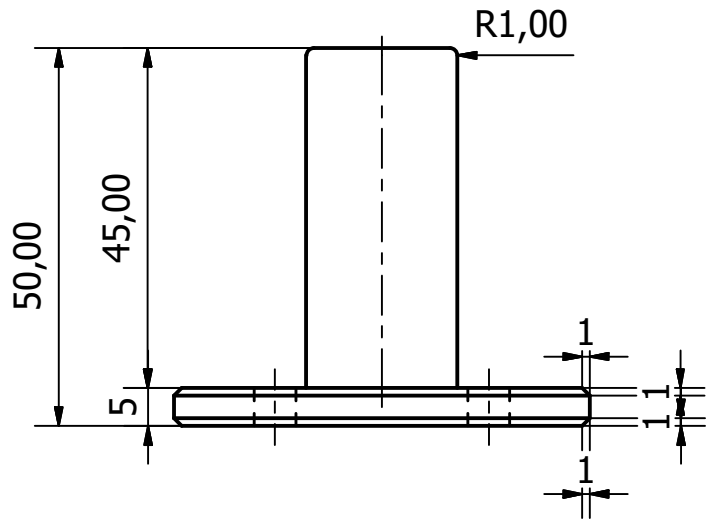
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:3
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Cabezal B	Unidades mm	Hoja 13 / 15



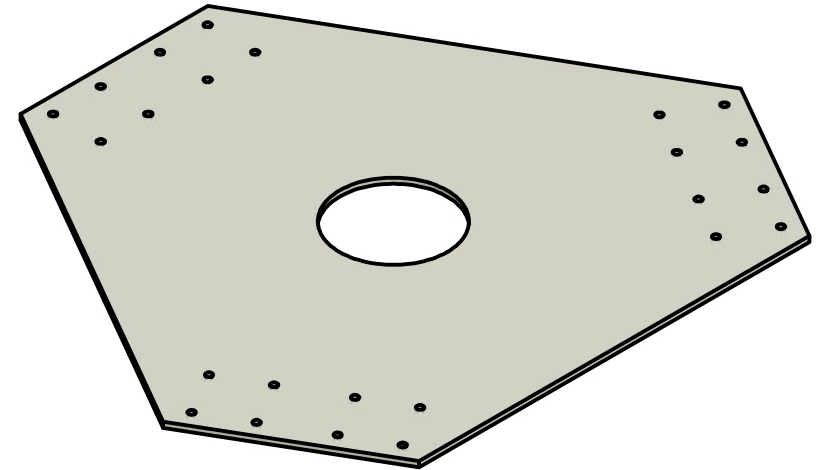
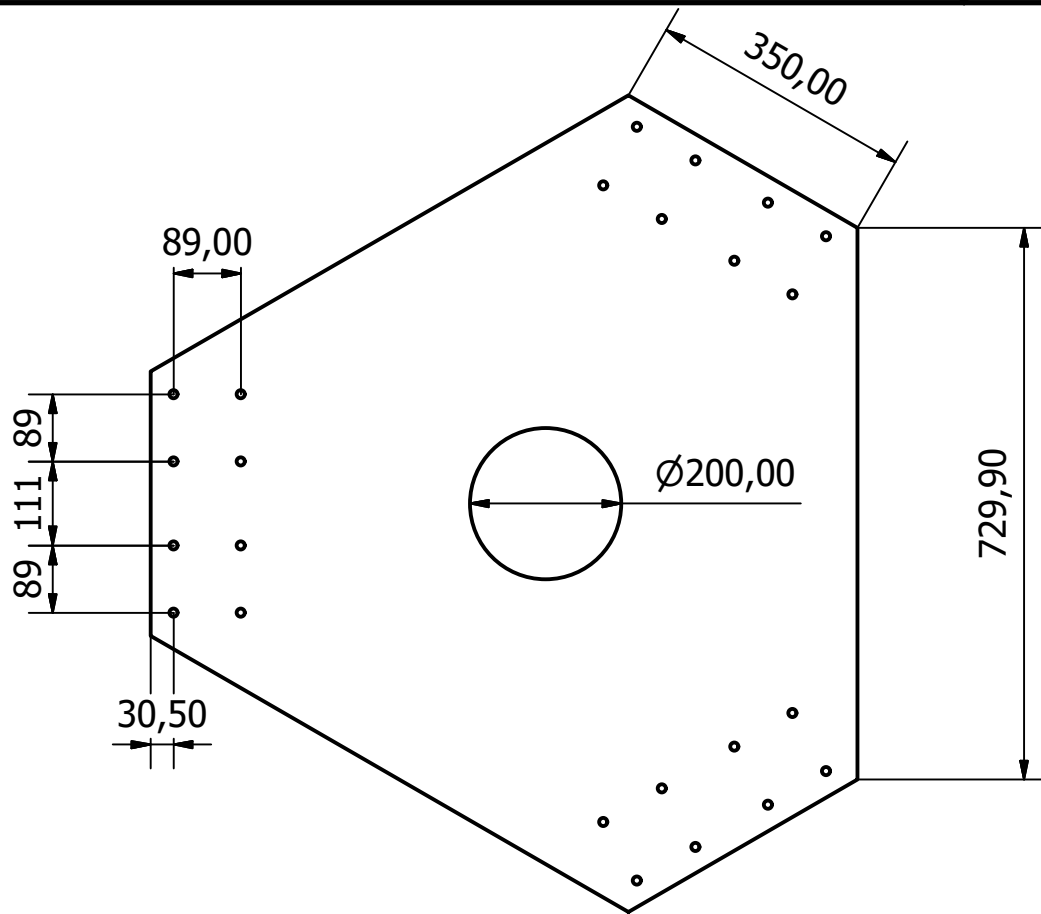
Diseño de			Fecha		Escala	
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017		1:3	
ETSII Béjar				Plataforma Stewart-Gough		
				Cabezal A		Unidades
				mm	12 / 15	



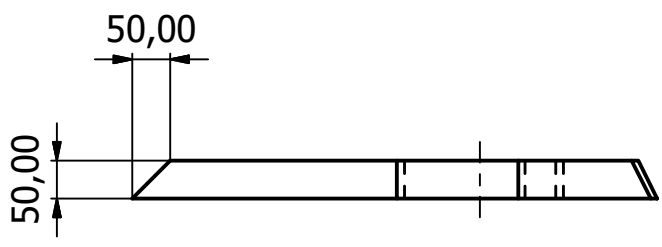
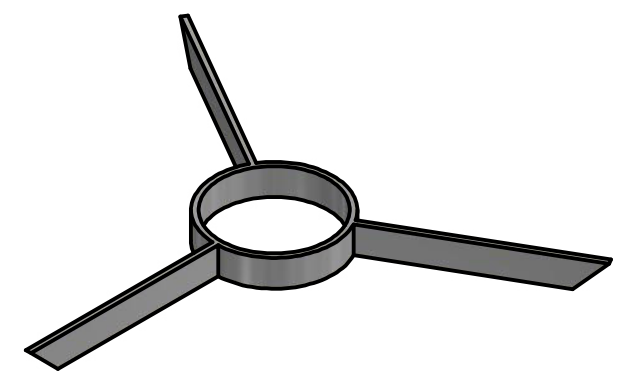
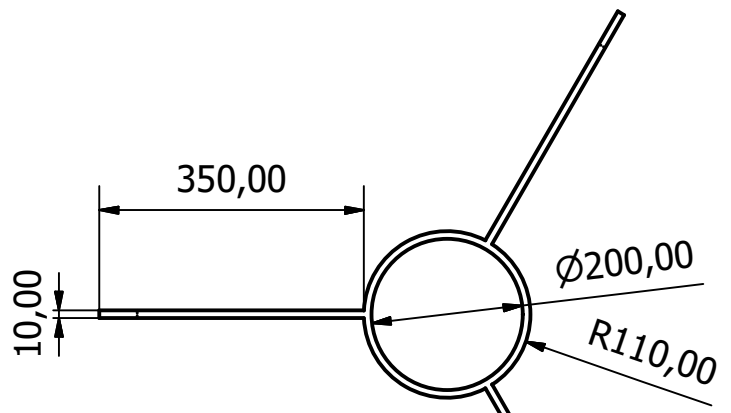
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:2
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Unión universal	Unidades mm	Hoja 14 / 15



Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:1
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Eje	Unidades mm	Hoja 11 / 15

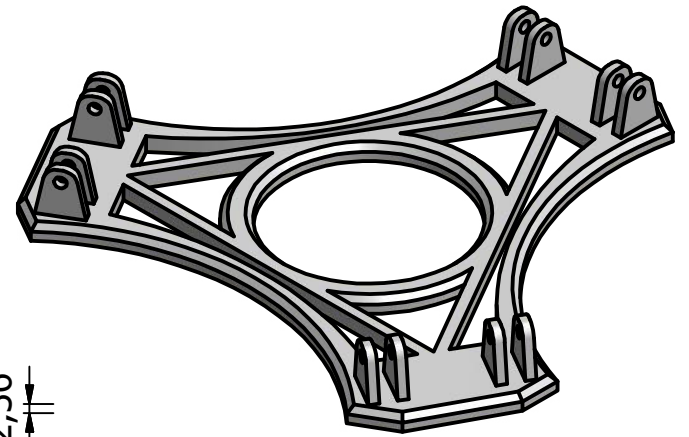
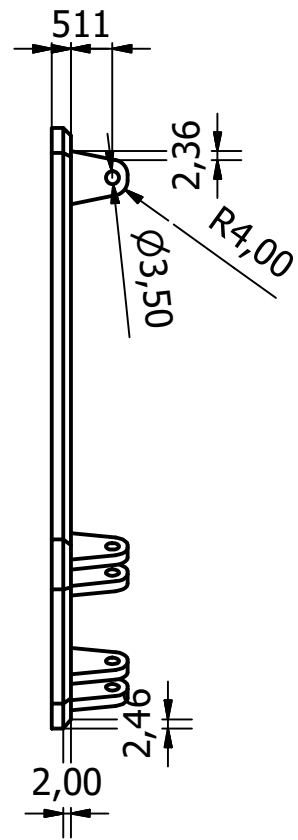
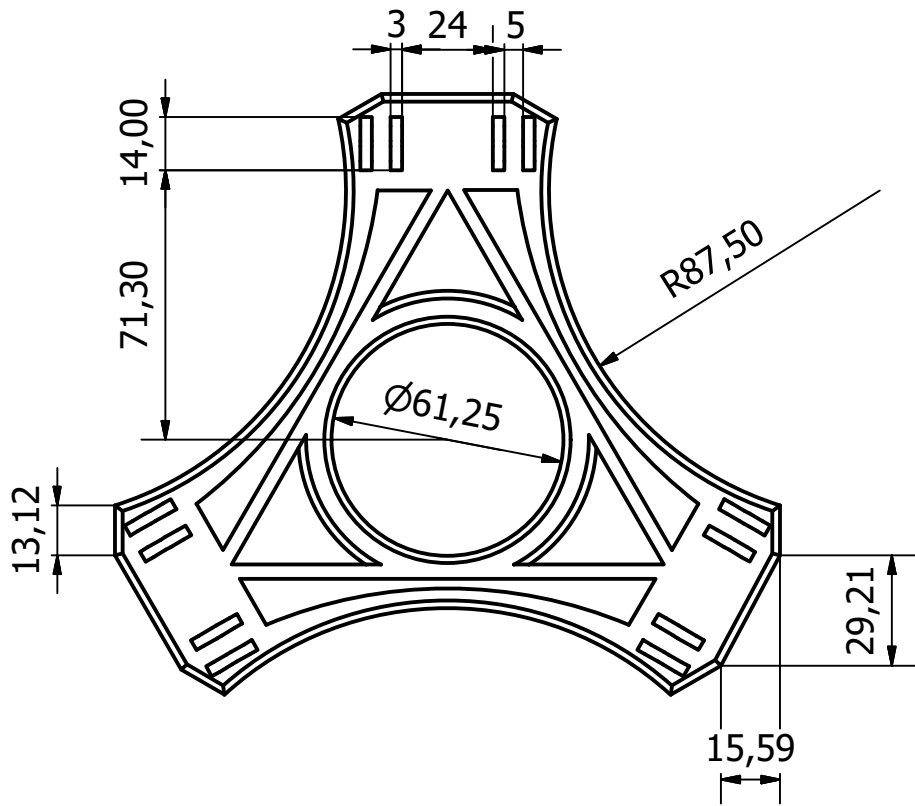


Diseño de		Fecha		Escala	
Ignacio Plasencia Jara		04/09/2017		1:10	
ETSII Béjar			Plataforma Stewart-Gough		
			Base superior simple		Unidades mm

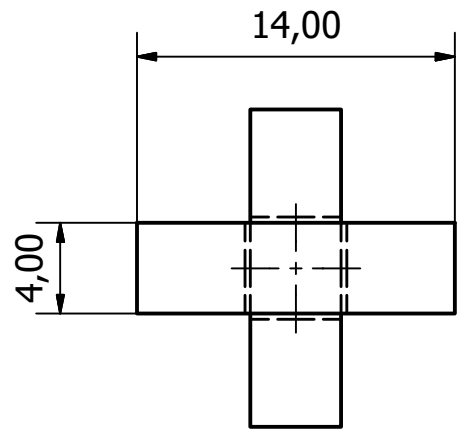
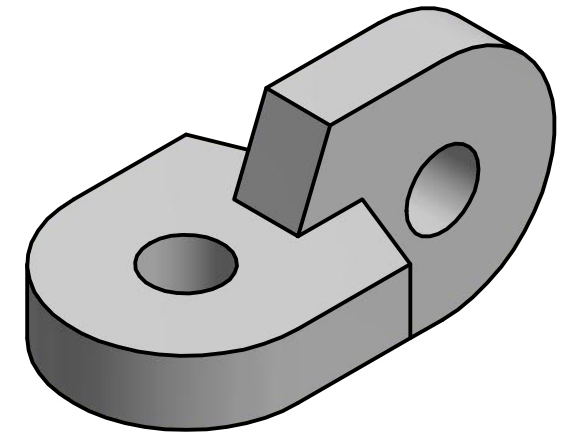
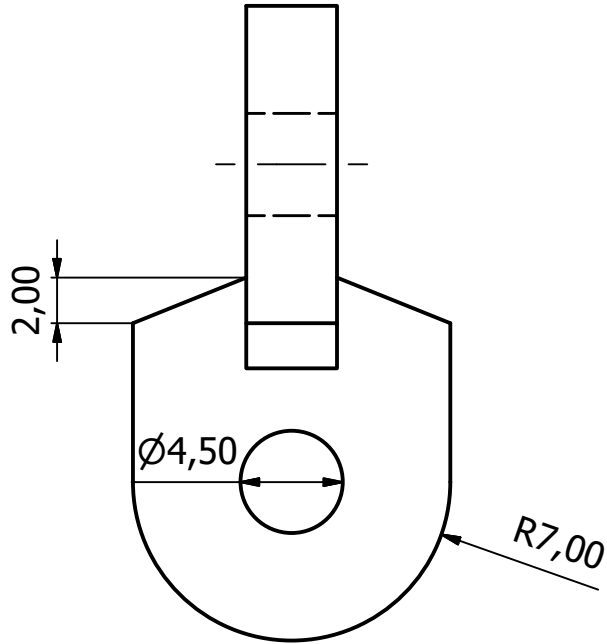
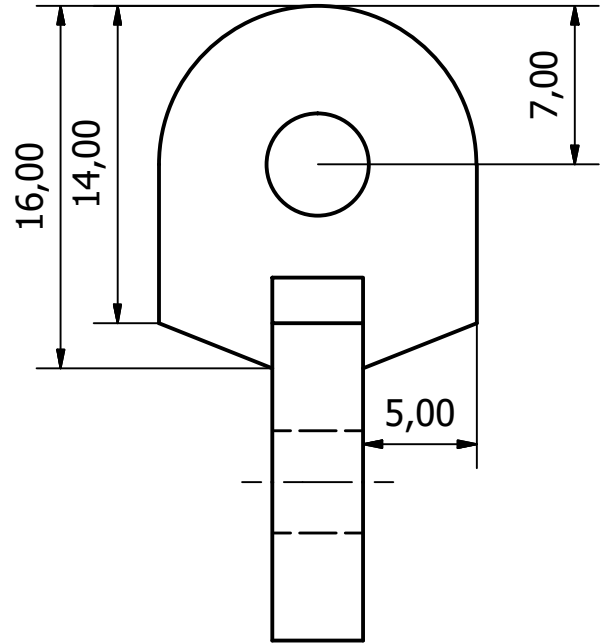


Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			04/09/2017	1:10
ETSII Béjar		Plataforma Stewart-Gough		
		Refuerzo base superior	Unidades mm	Hoja 15 / 15

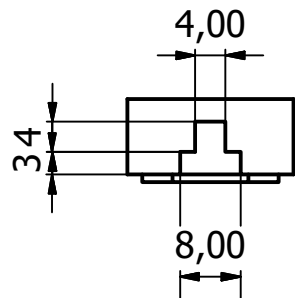
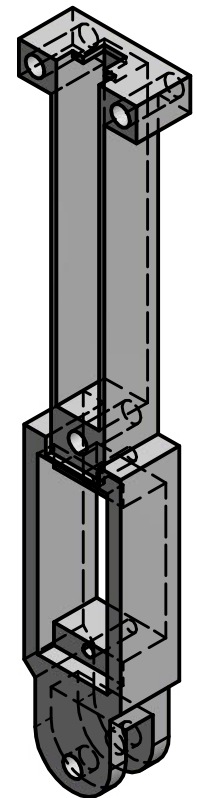
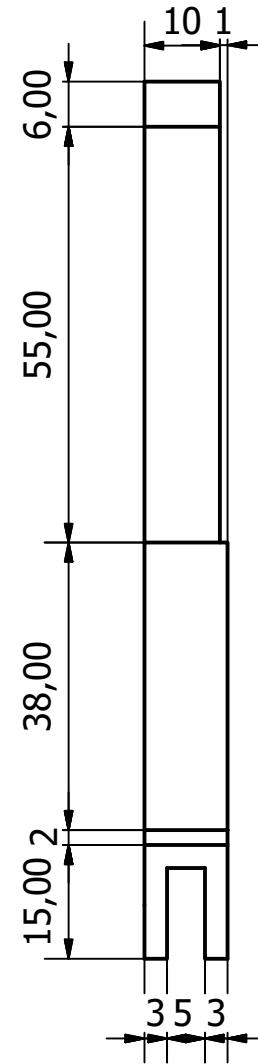
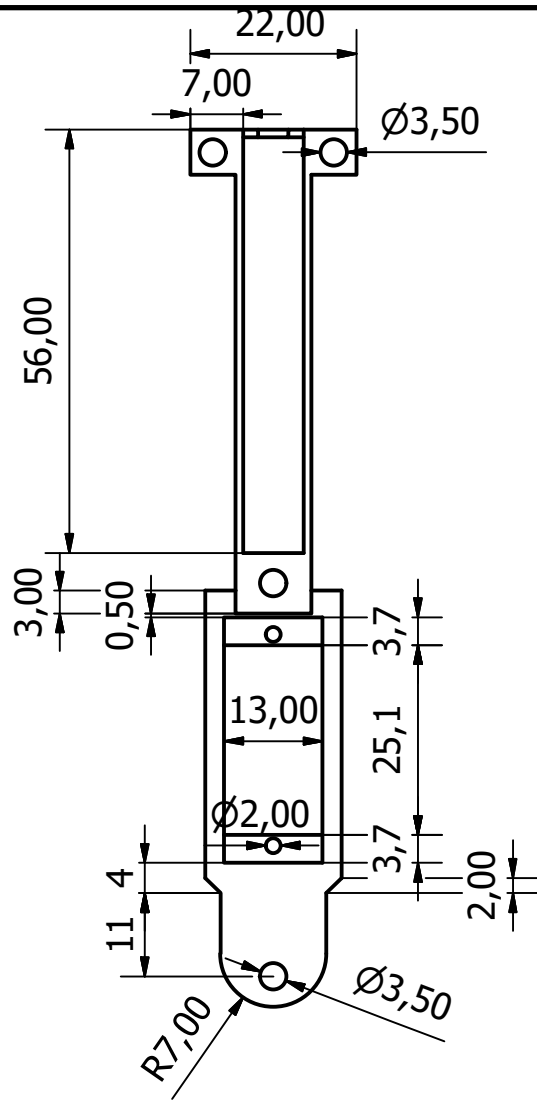
Piezas de la maqueta



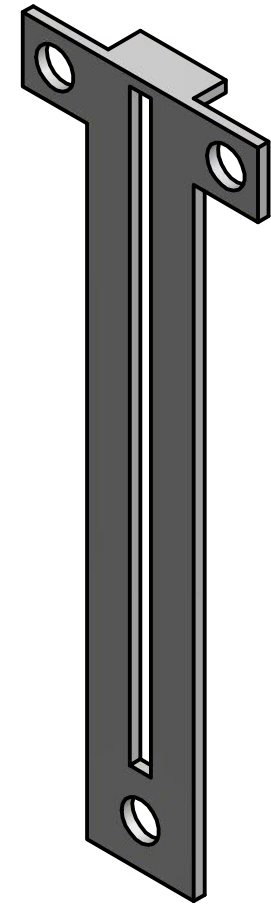
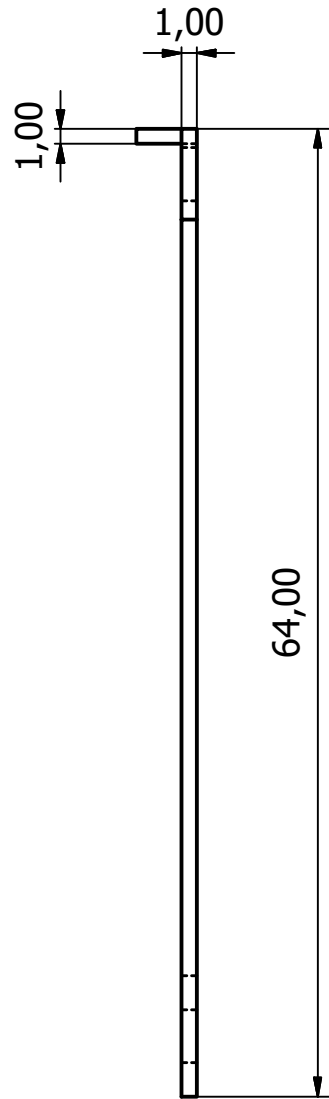
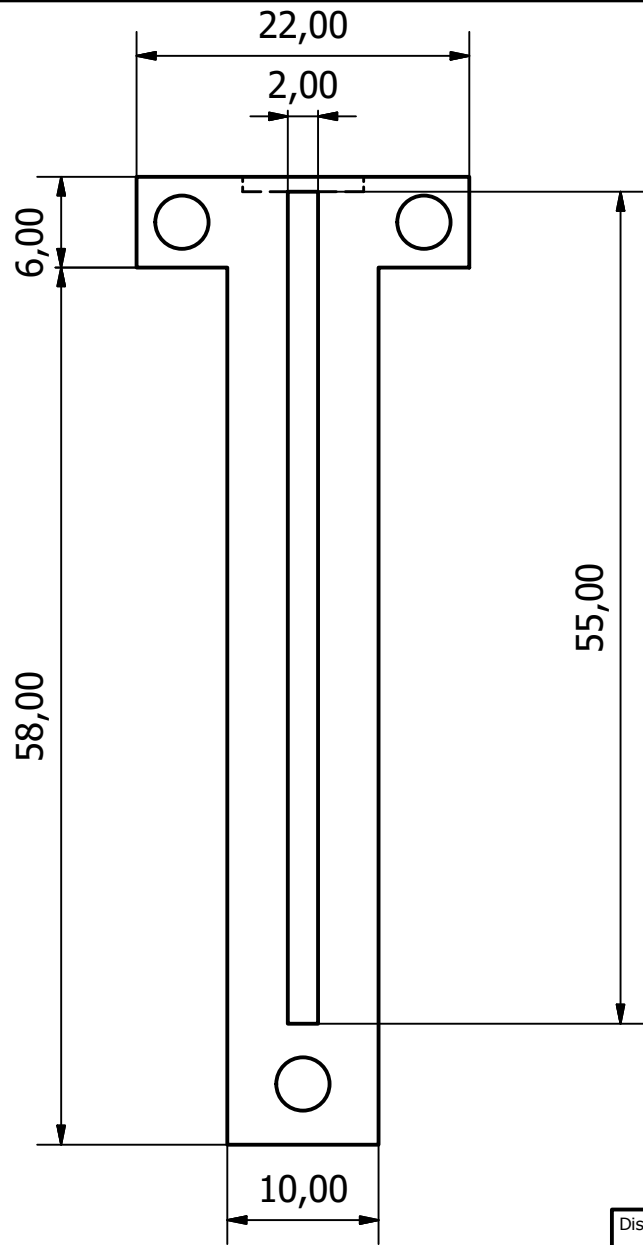
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	1:2
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
Base inferior		Unidades	Hoja	
		mm	5 / 13	



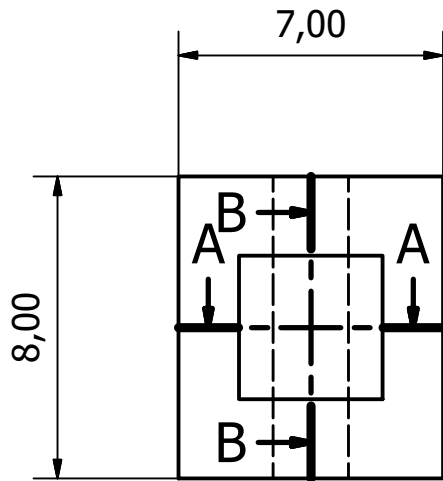
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	3:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Unión base	Unidades mm	Hoja 6 / 13



Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	1:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
Cuerpo del actuador		Unidades	Hoja	
		mm	13 / 13	

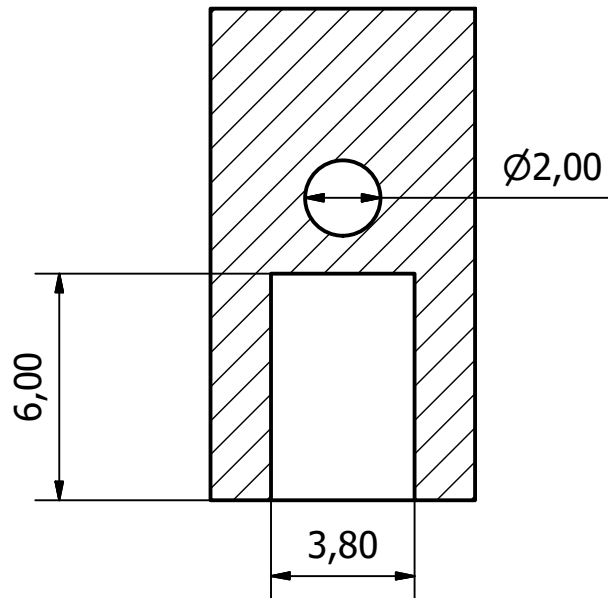
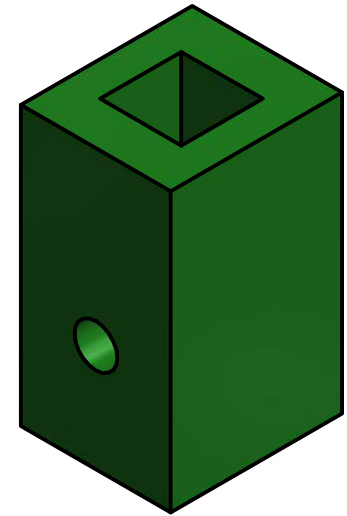
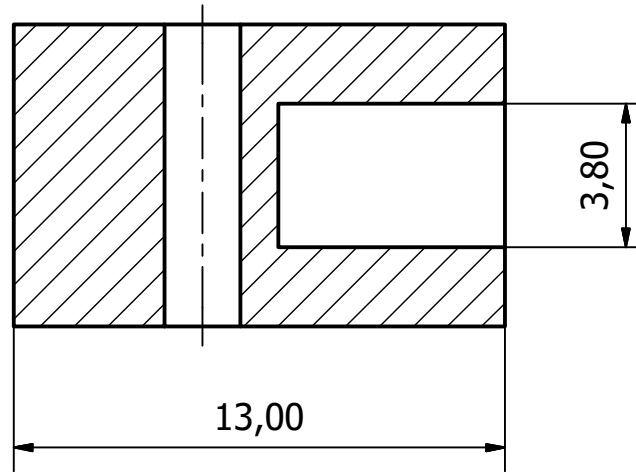


Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	2:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Tapa	Unidades mm	Hoja 7 / 13

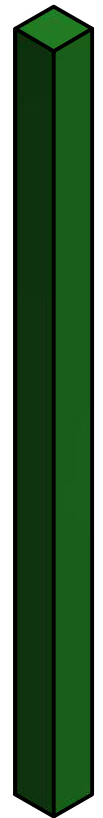
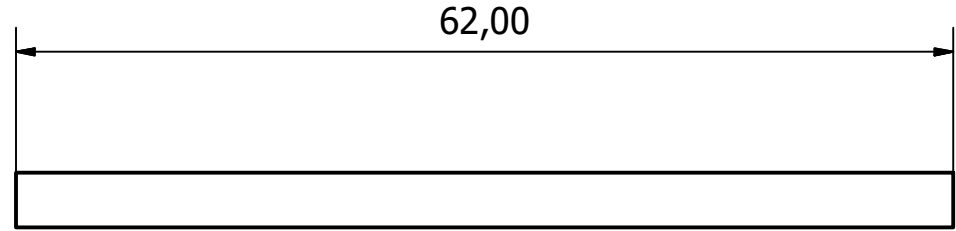
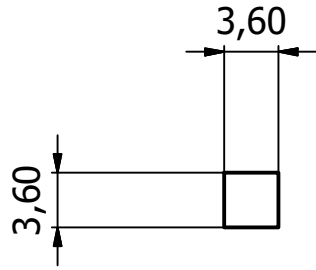
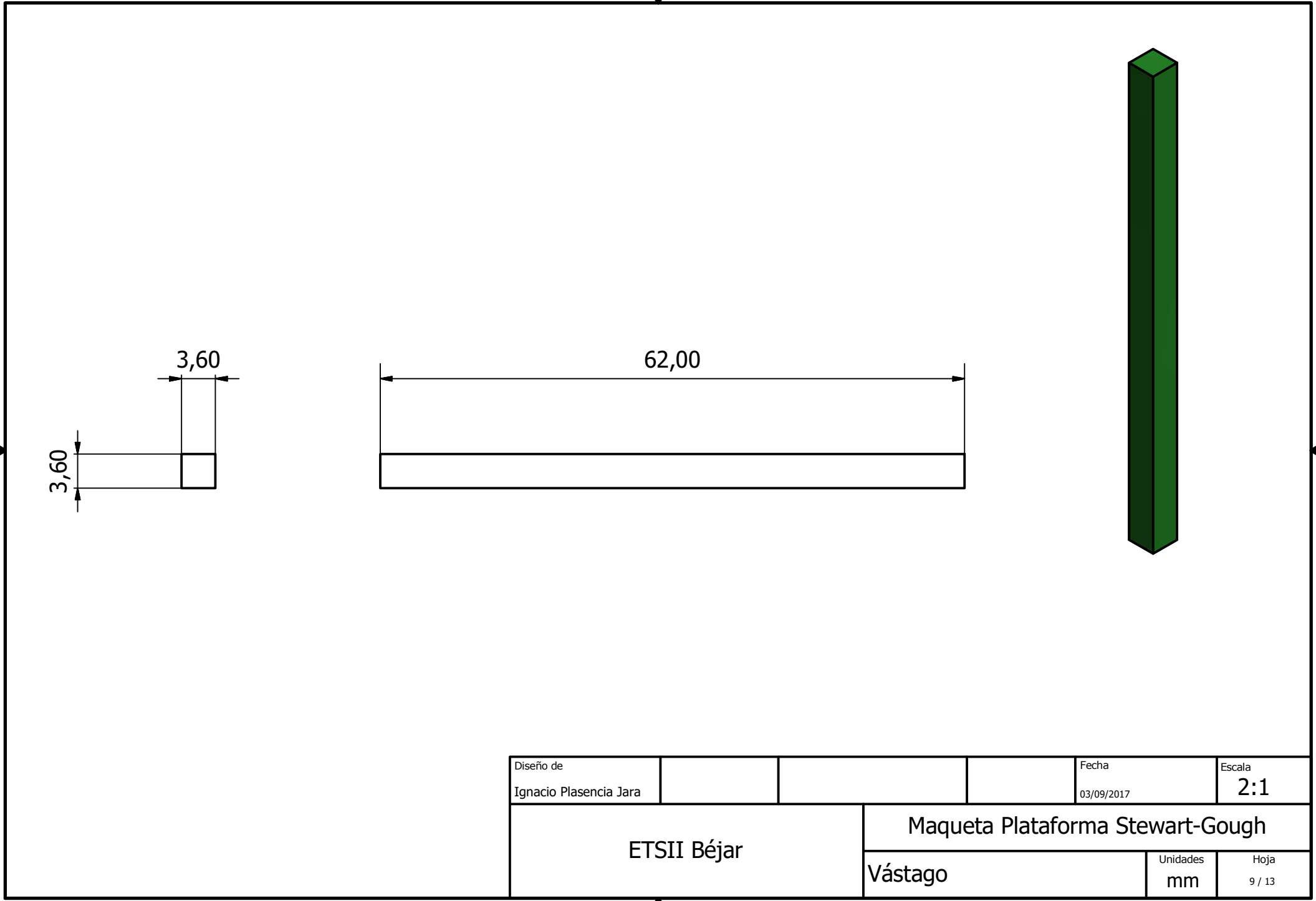


A-A (5 : 1)

B-B (5 : 1)

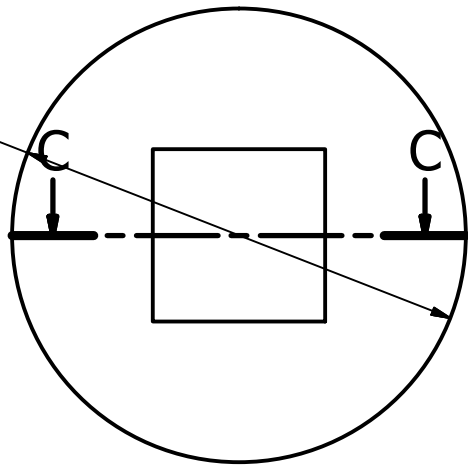


Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	5:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
Émbolo			Unidades	Hoja
			mm	8 / 13

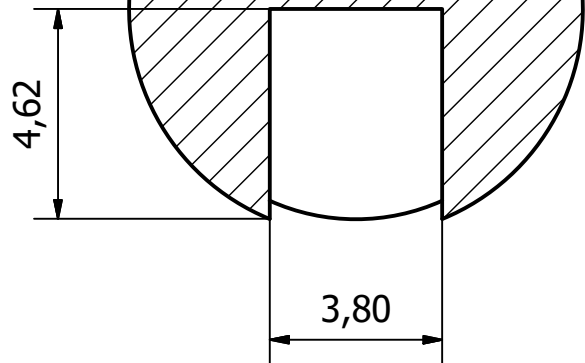
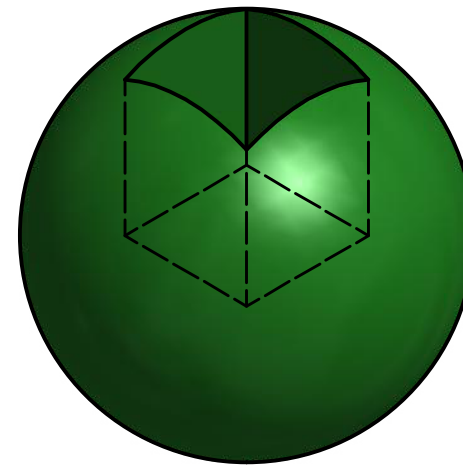


Diseño de				Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara				03/09/2017	2:1
ETSII Béjar			Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
			Vástago	Unidades mm	Hoja 9 / 13

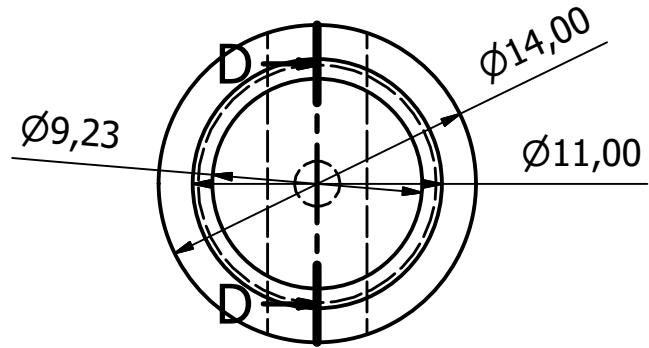
Ø10,00



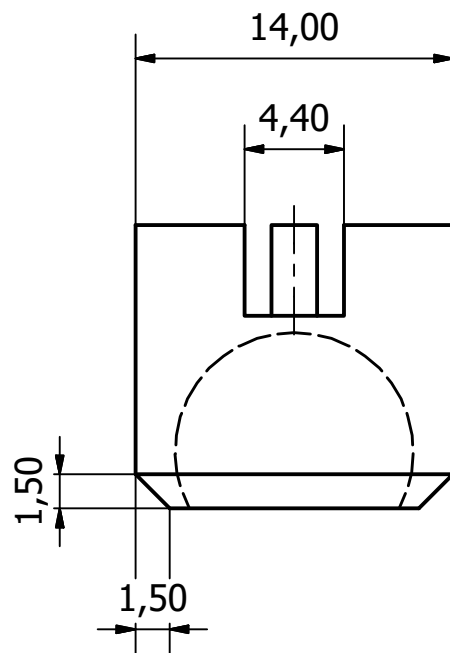
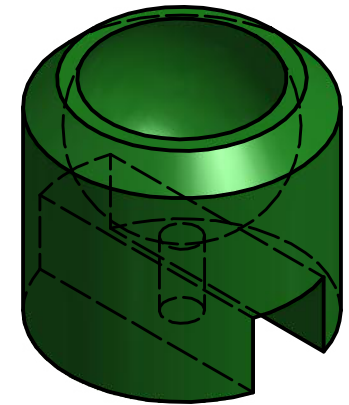
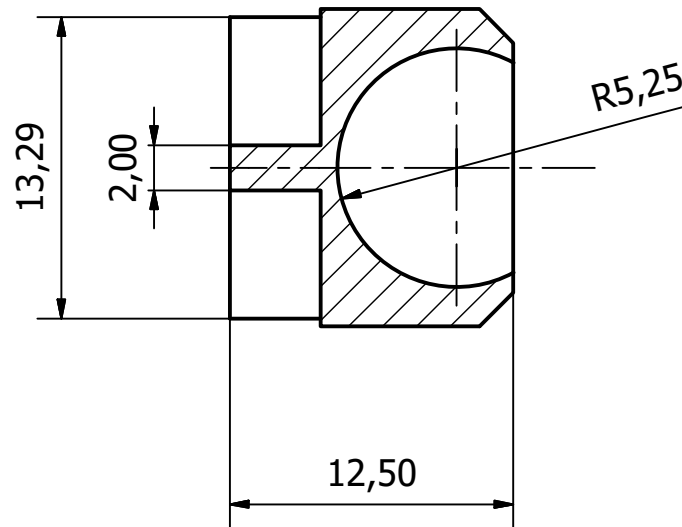
C-C (6:1)



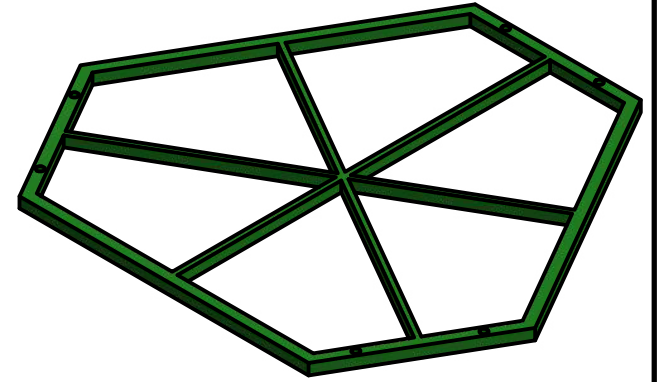
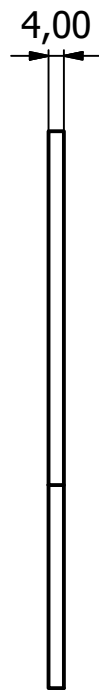
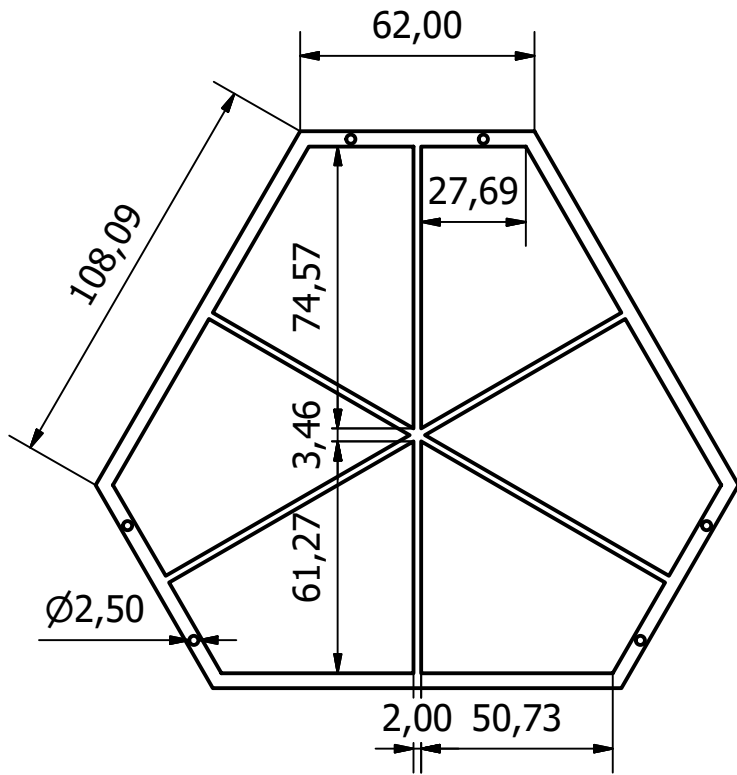
Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	6:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
Esfera			Unidades mm	Hoja 10 / 13



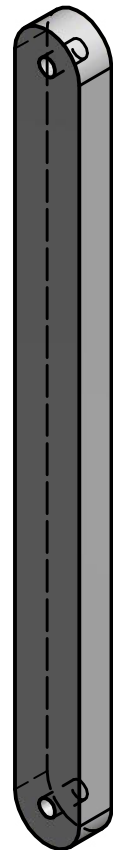
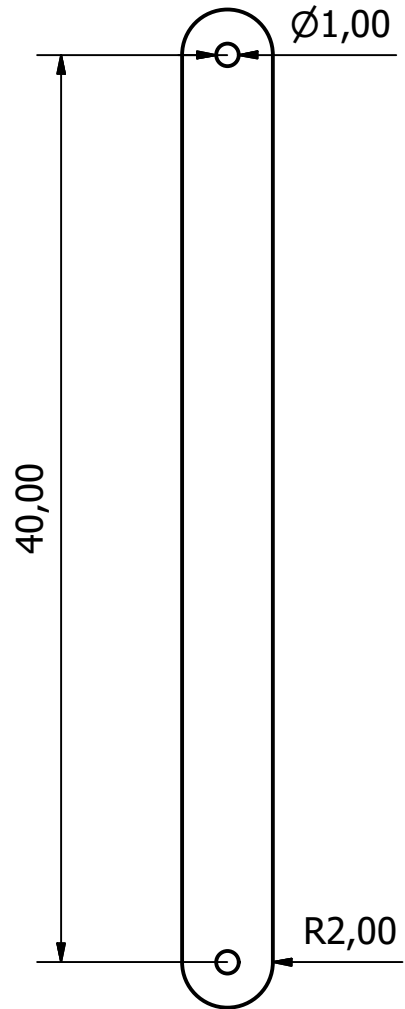
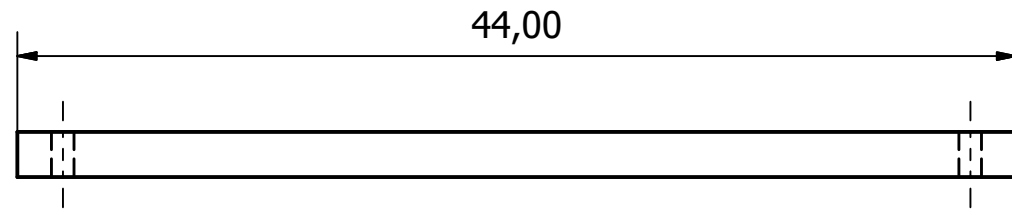
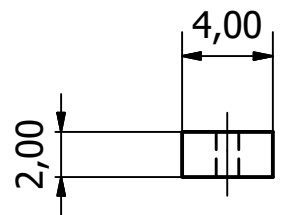
D-D (3 : 1)



Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	5:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Rótula	Unidades mm	Hoja 11 / 13



Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	1:2
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Base superior	Unidades mm	Hoja 4 / 13



Diseño de			Fecha	Escala
Ignacio Plasencia Jara			03/09/2017	3:1
ETSII Béjar		Maqueta Plataforma Stewart-Gough		
		Biela	Unidades mm	Hoja 12 / 13

Anexo IV: Programación en Mathemática

Programación robot digital

PLATAFORMA STEWART – GOUGH; PPI;

Longitudes de las bases;

$$c1 = 200;$$

$$c2 = 675;$$

Longitudes mínimas y máximas de los actuadores;

$$LMIN = 1035;$$

$$LMAX = 1535;$$

Coordenadas base fija;

$$A1 = \begin{pmatrix} c1 / 2 \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A2 = \begin{pmatrix} -(c1 / 2) \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A3 = \begin{pmatrix} -((c1 + c2) / 2) \\ -(\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A4 = \begin{pmatrix} -(c2 / 2) \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A5 = \begin{pmatrix} c2 / 2 \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A6 = \begin{pmatrix} (c1 + c2) / 2 \\ -(\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Coordenadas base móvil;

$$B1 = \begin{pmatrix} c2 / 2 \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B2 = \begin{pmatrix} -(c2 / 2) \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B3 = \begin{pmatrix} -((c1 + c2) / 2) \\ (\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B4 = \begin{pmatrix} -(c1 / 2) \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B5 = \begin{pmatrix} c1 / 2 \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B6 = \begin{pmatrix} (c1 + c2) / 2 \\ (\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Vector de posición;

$$P = \begin{pmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{pmatrix};$$

Matriz de orientación;

$$R = \begin{pmatrix} \text{Cos}[\alpha] * \text{Cos}[\theta] & \text{Cos}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Sin}[\psi] - \text{Sin}[\alpha] * \text{Cos}[\psi] & \text{Sin}[\alpha] * \text{Sin}[\psi] + \text{Cos}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Cos}[\psi] \\ \text{Sin}[\alpha] * \text{Cos}[\theta] & \text{Cos}[\alpha] * \text{Cos}[\psi] + \text{Sin}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Sin}[\psi] & \text{Sin}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Cos}[\psi] - \text{Cos}[\alpha] * \text{Sin}[\psi] \\ -\text{Sin}[\theta] & \text{Cos}[\theta] * \text{Sin}[\psi] & \text{Cos}[\theta] * \text{Cos}[\psi] \end{pmatrix};$$

Posición de la plataforma móvil;

Px = 0;

Py = -1379.3;

Pz = 15;

α = 0;

θ = 0;

ψ = 0;

Longitud de los actuadores;

Print["**LONGITUD DE LOS ACTUADORES**"]

L1 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B1].B1 +

Transpose[A1].A1 + 2 * Transpose[P].R.B1 - 2 * Transpose[P].A1 - 2 * Transpose[R.B1].A1]]];

L2 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B2].B2 + Transpose[A2].A2 + 2 * Transpose[P].R.B2 -

2 * Transpose[P].A2 - 2 * Transpose[R.B2].A2]]];

L3 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B3].B3 + Transpose[A3].A3 + 2 * Transpose[P].R.B3 -

2 * Transpose[P].A3 - 2 * Transpose[R.B3].A3]]];

L4 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B4].B4 + Transpose[A4].A4 + 2 * Transpose[P].R.B4 -

2 * Transpose[P].A4 - 2 * Transpose[R.B4].A4]]];

L5 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B5].B5 + Transpose[A5].A5 + 2 * Transpose[P].R.B5 -

2 * Transpose[P].A5 - 2 * Transpose[R.B5].A5]]];

L6 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B6].B6 + Transpose[A6].A6 + 2 * Transpose[P].R.B6 -

2 * Transpose[P].A6 - 2 * Transpose[R.B6].A6]]];

If[(L1 < 1035) || (L1 > 1535), Print["Valor L1 fuera de rango permisible"], Print["L1=", L1]];

If[(L2 < 1035) || (L2 > 1535), Print["Valor L2 fuera de rango permisible"], Print["L2=", L2]];

If[(L3 < 1035) || (L3 > 1535), Print["Valor L3 fuera de rango permisible"], Print["L3=", L3]];

If[(L4 < 1035) || (L4 > 1535), Print["Valor L4 fuera de rango permisible"], Print["L4=", L4]];

If[(L5 < 1035) || (L5 > 1535), Print["Valor L5 fuera de rango permisible"], Print["L5=", L5]];

If[(L6 < 1035) || (L6 > 1535), Print["Valor L6 fuera de rango permisible"], Print["L6=", L6]];

Valores a introducir en Inventor;

Print["**VALORES A INTRODUCIR EN INVENTOR**"]

D1 = L1 - LMIN + 42.5;

D2 = L2 - LMIN + 42.5;

D3 = L3 - LMIN + 42.5;

D4 = L4 - LMIN + 42.5;

D5 = L5 - LMIN + 42.5;

D6 = L6 - LMIN + 42.5;

If[(L1 < 1035) || (L1 > 1535), Print["Valor L1 fuera de rango permisible"], Print["D1=", D1]];

If[(L2 < 1035) || (L2 > 1535), Print["Valor L2 fuera de rango permisible"], Print["D2=", D2]];

If[(L3 < 1035) || (L3 > 1535), Print["Valor L3 fuera de rango permisible"], Print["D3=", D3]];

If[(L4 < 1035) || (L4 > 1535), Print["Valor L4 fuera de rango permisible"], Print["D4=", D4]];

If[(L5 < 1035) || (L5 > 1535), Print["Valor L5 fuera de rango permisible"], Print["D5=", D5]];

If[(L6 < 1035) || (L6 > 1535), Print["Valor L6 fuera de rango permisible"], Print["D6=", D6]];

Programación maqueta

PLATAFORMA STEWART – GOUGH; PPI;

Longitudes de las bases;

$$c1 = 35;$$

$$c2 = 118.125;$$

Longitudes mínimas y máximas de los actuadores;

$$LMIN = 140.937;$$

$$LMAX = 170.646;$$

Coordenadas base fija;

$$A1 = \begin{pmatrix} c1 / 2 \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A2 = \begin{pmatrix} -(c1 / 2) \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A3 = \begin{pmatrix} -((c1 + c2) / 2) \\ -(\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A4 = \begin{pmatrix} -(c2 / 2) \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A5 = \begin{pmatrix} c2 / 2 \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$A6 = \begin{pmatrix} (c1 + c2) / 2 \\ -(\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Coordenadas base móvil;

$$B1 = \begin{pmatrix} c2 / 2 \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B2 = \begin{pmatrix} -(c2 / 2) \\ (\sqrt{3} / 6) * (2 * c1 + c2) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B3 = \begin{pmatrix} -((c1 + c2) / 2) \\ (\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B4 = \begin{pmatrix} -(c1 / 2) \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B5 = \begin{pmatrix} c1 / 2 \\ -(\sqrt{3} / 6) * (2 * c2 + c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$B6 = \begin{pmatrix} (c1 + c2) / 2 \\ (\sqrt{3} / 6) * (c2 - c1) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Vector de posición;

$$P = \begin{pmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{pmatrix};$$

Matriz de orientación;

$$R = \begin{pmatrix} \text{Cos}[\alpha] * \text{Cos}[\theta] & \text{Cos}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Sin}[\psi] - \text{Sin}[\alpha] * \text{Cos}[\psi] & \text{Sin}[\alpha] * \text{Sin}[\psi] + \text{Cos}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Cos}[\psi] \\ \text{Sin}[\alpha] * \text{Cos}[\theta] & \text{Cos}[\alpha] * \text{Cos}[\psi] + \text{Sin}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Sin}[\psi] & \text{Sin}[\alpha] * \text{Sin}[\theta] * \text{Cos}[\psi] - \text{Cos}[\alpha] * \text{Sin}[\psi] \\ -\text{Sin}[\theta] & \text{Cos}[\theta] * \text{Sin}[\psi] & \text{Cos}[\theta] * \text{Cos}[\psi] \end{pmatrix};$$

Posición de la plataforma móvil;

```
Px = 0;
Py = 0;
Pz = 140;
α = 0;
θ = 0;
ψ = 0;
```

Longitud de los actuadores;

```
Print["LONGITUD DE LOS ACTUADORES"]
```

```
L1 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B1].B1 +
  Transpose[A1].A1 + 2 * Transpose[P].R.B1 - 2 * Transpose[P].A1 - 2 * Transpose[R.B1].A1]];
L2 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B2].B2 + Transpose[A2].A2 + 2 * Transpose[P].R.B2 -
  2 * Transpose[P].A2 - 2 * Transpose[R.B2].A2]];
L3 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B3].B3 + Transpose[A3].A3 + 2 * Transpose[P].R.B3 -
  2 * Transpose[P].A3 - 2 * Transpose[R.B3].A3]];
L4 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B4].B4 + Transpose[A4].A4 + 2 * Transpose[P].R.B4 -
  2 * Transpose[P].A4 - 2 * Transpose[R.B4].A4]];
L5 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B5].B5 + Transpose[A5].A5 + 2 * Transpose[P].R.B5 -
  2 * Transpose[P].A5 - 2 * Transpose[R.B5].A5]];
L6 = Det[Sqrt[Transpose[P].P + Transpose[B6].B6 + Transpose[A6].A6 + 2 * Transpose[P].R.B6 -
  2 * Transpose[P].A6 - 2 * Transpose[R.B6].A6]];
If[(L1 < LMIN) || (L1 > LMAX), Print["Valor L1 fuera de rango permisible"], Print["L1=", L1]];
If[(L2 < LMIN) || (L2 > LMAX), Print["Valor L2 fuera de rango permisible"], Print["L2=", L2]];
If[(L3 < LMIN) || (L3 > LMAX), Print["Valor L3 fuera de rango permisible"], Print["L3=", L3]];
If[(L4 < LMIN) || (L4 > LMAX), Print["Valor L4 fuera de rango permisible"], Print["L4=", L4]];
If[(L5 < LMIN) || (L5 > LMAX), Print["Valor L5 fuera de rango permisible"], Print["L5=", L5]];
If[(L6 < LMIN) || (L6 > LMAX), Print["Valor L6 fuera de rango permisible"], Print["L6=", L6]];
```

Valores de giro de servo;

```
Print["VALORES DE GIRO DE SERVO"]
```

```
G1 = -(L1 - LMIN) * (90 / 15) + 180;
G2 = -(L2 - LMIN) * (90 / 15) + 180;
G3 = -(L3 - LMIN) * (90 / 15) + 180;
G4 = -(L4 - LMIN) * (90 / 15) + 180;
G5 = -(L5 - LMIN) * (90 / 15) + 180;
G6 = -(L6 - LMIN) * (90 / 15) + 180;
If[(L1 < LMIN) || (L1 > LMAX), Print["Valor G1 fuera de rango permisible"], Print["G1=", G1]];
If[(L2 < LMIN) || (L2 > LMAX), Print["Valor G2 fuera de rango permisible"], Print["G2=", G2]];
If[(L3 < LMIN) || (L3 > LMAX), Print["Valor G3 fuera de rango permisible"], Print["G3=", G3]];
If[(L4 < LMIN) || (L4 > LMAX), Print["Valor G4 fuera de rango permisible"], Print["G4=", G4]];
If[(L5 < LMIN) || (L5 > LMAX), Print["Valor G5 fuera de rango permisible"], Print["G5=", G5]];
If[(L6 < LMIN) || (L6 > LMAX), Print["Valor G6 fuera de rango permisible"], Print["G6=", G6]];
```


Anexo V: Programación en C++ para arduino

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo Servo1;  
Servo Servo2;  
Servo Servo3;  
Servo Servo4;  
Servo Servo5;  
Servo Servo6;
```

```
void setup()
```

```
{  
  Servo1.attach(3);  
  Servo2.attach(5);  
  Servo3.attach(6);  
  Servo4.attach(9);  
  Servo5.attach(10);  
  Servo6.attach(11);  
}
```

```
void loop()
```

```
{  
  //Movimiento en el eje Z//  
  Servo1.write(180);  
  Servo2.write(180);  
  Servo3.write(180);  
  Servo4.write(180);  
  Servo5.write(180);  
  Servo6.write(180);  
  delay(2000);  
  Servo1.write(0);  
  Servo2.write(0);  
  Servo3.write(0);  
  Servo4.write(0);  
  Servo5.write(0);  
  Servo6.write(0);  
  delay(2000);  
  Servo1.write(180);  
  Servo2.write(180);  
  Servo3.write(180);  
  Servo4.write(180);  
  Servo5.write(180);  
  Servo6.write(180);  
  delay(2000);  
  Servo1.write(90);  
  Servo2.write(90);  
  Servo3.write(90);  
  Servo4.write(90);  
  Servo5.write(90);  
  Servo6.write(90);  
}
```



```
delay(2000);
//Movimiento en el eje X//
Servo1.write(167);
Servo2.write(2);
Servo3.write(81);
Servo4.write(167);
Servo5.write(2);
Servo6.write(81);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
Servo1.write(2);
Servo2.write(167);
Servo3.write(81);
Servo4.write(2);
Servo5.write(167);
Servo6.write(81);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
//Movimiento en el eje Y//
Servo1.write(35);
Servo2.write(35);
Servo3.write(180);
Servo4.write(35);
Servo5.write(35);
Servo6.write(180);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
Servo1.write(126);
Servo2.write(126);
Servo3.write(2);
Servo4.write(126);
```

```
Servo5.write(126);
Servo6.write(2);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
//Giro en el eje Z//
Servo1.write(162);
Servo2.write(15);
Servo3.write(162);
Servo4.write(15);
Servo5.write(162);
Servo6.write(15);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
Servo1.write(15);
Servo2.write(162);
Servo3.write(15);
Servo4.write(162);
Servo5.write(15);
Servo6.write(162);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
//Giro en el eje X//
Servo1.write(0);
Servo2.write(0);
Servo3.write(114);
Servo4.write(153);
Servo5.write(153);
Servo6.write(114);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
```

```
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
Servo1.write(153);
Servo2.write(153);
Servo3.write(114);
Servo4.write(2);
Servo5.write(2);
Servo6.write(114);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
//Giro en el eje Y//
Servo1.write(114);
Servo2.write(66);
Servo3.write(2);
Servo4.write(30);
Servo5.write(154);
Servo6.write(174);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
Servo1.write(66);
Servo2.write(114);
Servo3.write(174);
Servo4.write(154);
Servo5.write(30);
Servo6.write(2);
delay(2000);
Servo1.write(90);
Servo2.write(90);
Servo3.write(90);
Servo4.write(90);
Servo5.write(90);
Servo6.write(90);
delay(2000);
```

```
}
```

