



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**DESARROLLO DEL PROTOTIPO VIRTUAL
PARAMETRIZADO DE UN BRAZO
ROBÓTICO ARTICULADO. SIMULACIÓN
DINÁMICA Y ANÁLISIS MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS.**

AUTORA: SARA APARICIO PÉREZ

TUTOR: FRANCISCO EUGENIO ALBERT GIL

COTUTORA: MARÍA NURIA ALEIXOS BORRÁS

Curso Académico: 2020-21

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

AGRADECIMIENTOS

“A mi tutor del TFG, por haber estado siempre dispuesto a ayudar sin importar la hora o el día”

“A mi familia, por acompañarme durante todo el viaje de mis estudios, por apoyarme cuando las cosas iban mal y por celebrar mis triunfos conmigo”

“A mis amigos, por estar ahí desde el principio de la carrera y por haber superado todo juntos hasta el final”

“A Clari, por creer siempre en mí y ayudarme a sacar mi mayor potencial”

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

RESUMEN

Este proyecto consiste en la realización del prototipo virtual de un brazo robótico articulado haciendo uso de la herramienta Autodesk Inventor. Para la creación de este prototipo virtual se modelarán y ensamblarán todas las piezas para obtener el conjunto. Con el objetivo de que el prototipo sea válido para diferentes aplicaciones, se realizará un estudio de los parámetros principales de manera que se puedan realizar cambios rápidamente para obtener brazos con distintas especificaciones derivados del original.

El prototipo original se validará mediante la simulación del comportamiento mecánico y el análisis estático con el método de los elementos finitos del subconjunto que funcionará como brazo del robot. A partir de los datos obtenidos de la simulación y análisis por elementos finitos se comprobará el correcto funcionamiento del modelo, se determinará el par de torsión necesario para cada articulación y se propondrán modificaciones para abaratar su coste o mejorar sus prestaciones.

Para realizar la correcta ejecución de este trabajo se utilizarán principalmente los conocimientos aprendidos en la asignatura de Ingeniería Gráfica del Grado de Ingeniería de Tecnologías Industriales.

Palabras clave: Prototipo virtual, brazo robótico, parametrización, simulación dinámica, elementos finitos.

RESUM

Aquest projecte consisteix en la realització del prototip virtual d'un braç robòtic articulat fent ús de l'eina Autodesk Inventor. Per a la creació d'aquest prototip virtual es modelaran i assemblaran totes les peces per a obtindre el conjunt. Amb l'objectiu que el prototip siga vàlid per a diferents aplicacions, es realitzarà un estudi dels paràmetres principals de manera que es puguen fer canvis ràpidament per a obtindre braços amb diferents especificacions derivats de l'original.

El prototip original es validarà mitjançant la simulació del comportament mecànic i l'anàlisi estàtic amb el mètode dels elements finits del subconjunt que funcionarà com a braç del robot. A partir de les dades obtingudes de la simulació i anàlisi per elements finits es comprovarà el correcte funcionament del model, es determinarà el parell de torsió necessari per a cada articulació i es proposaran modificacions per a abaratir el seu cost o millorar les seues prestacions.

Per a realitzar la correcta execució d'aquest treball s'utilitzaran principalment els coneixements apresos en l'assignatura d'Enginyeria Gràfica del Grau d'Enginyeria de Tecnologies Industrials.

Paraules clau: Prototip virtual, braç robòtic, parametrització, simulació dinàmica, elements finits.

ABSTRACT

This project consists of the realization of the virtual prototype of an articulated robotic arm using the Autodesk Inventor tool. For the creation of this virtual prototype, all the pieces will be modeled and assembled to obtain the robotic arm. In order for the prototype to be valid for different applications, a study of the main parameters will be carried out so that changes can be made quickly to obtain arms with different specifications derived from the original.

The original prototype will be validated by simulating the mechanical behavior and static analysis with the finite element method of the subset that will function as the robot arm. From the data obtained from the simulation and finite element analysis, the correct operation of the model will be checked, the torque required for each joint will be determined and modifications will be proposed to lower its cost or improve its performance.

To carry out the correct execution of this work, the knowledge that will mainly be used will be the one learned in the subject of Graphic Engineering of the Degree in Industrial Technologies Engineering.

Keywords: Virtual prototype, robotic arm, parameterization, dynamic simulation, finite elements.

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- MEMORIA
- PRESUPUESTO
- PLANOS

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO	1
1.2. ALCANCE DEL PROYECTO	1
CAPÍTULO 2: EL BRAZO ROBÓTICO	2
2.1. HISTORIA	2
2.2. DISTINTAS CLASIFICACIÓN DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS	3
2.2.1. GENERACIÓN	3
2.2.2. AREA DE APLICACIÓN	3
2.2.3. CONFIGURACIÓN	4
2.3. ESTRUCTURA MECÁNICA	6
2.4. ESPECIFICACIONES PRINCIPALES DE UN BRAZO ROBÓTICO.....	7
2.4.1. GRADOS DE LIBERTAD	7
2.4.2. VOLUMEN DE TRABAJO	7
2.4.3. PRECISIÓN.....	8
2.4.4. CAPACIDAD DE CARGA	8
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	9
3.1. AUTODESK INVENTOR.....	9
3.2. ELEMENTOS FINITOS	9
CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO	11
4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROTOTIPO VIRTUAL	11
4.1.1. GRADOS DE LIBERTAD	11
4.1.2. ALCANCE Y AREA DE TRABAJO	11
4.1.1. CARGA MÁXIMA	13
4.1.1. GEOMETRÍA DE LOS OBJETOS	13
4.1.1. PESO DEL CONJUNTO	13
4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS.....	14

4.2.1. ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL EN AUTODESK INVENTOR	15
4.3. DISEÑO DE LAS ARTICULACIONES	15
4.3.1. FUNCIONAMIENTO DE LOS SERVOMOTORES	16
4.3.2. ELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES	17
4.4. PARAMETRIZACIÓN	18
CAPÍTULO 5: MODELADO	21
5.1. BASE	21
5.2. HOMBRO	21
5.3. BRAZO	23
5.4. ANTEBRAZO	23
5.5. SUBCONJUNTO GRIPPER	25
5.5.1. CONECTOR	25
5.5.2. SOPORTE	26
5.5.3. CHAPA	26
5.5.3. BARRA DE ARTICULACIÓN	27
5.5.4. ENGRANAJES	27
5.5.5. PINZA	29
5.5.6. PASADORES	29
CAPÍTULO 6: ENSAMBLAJE	30
6.1. RESTRICCIONES	30
6.2. CENTRO DE CONTENIDO	30
6.3. ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO	31
CAPÍTULO 7: SIMULACIÓN DINÁMICA	34
7.1. UNIONES	34
7.2. COEFICIENTE DE FRICCIÓN	35
7.4. PAR NECESARIO DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO-BRAZO	35
7.4. PAR NECESARIO DE LA ARTICULACIÓN BRAZO-ANTEBRAZO	38
7.4. CARGA MÁXIMA	40
7.4. SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO COMPUESTO	41
CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE TENSIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS	43
CAPÍTULO 9: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE MEJORA	48
9.1. ARTICULACIONES MEDIANTE ENGRANAJES	48
9.2. SELECCIÓN DE UN SERVOMOTOR CON MAYOR PAR DE TORSIÓN	49
9.3. REDUCCIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO	51
CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2: EL BRAZO ROBÓTICO	2
FIGURA 2.1. PRIMER ROBOT PROGRAMABLE DE GEORGE DEVOL.....	2
FIGURA 2.2. BRAZO ROBÓTICO INDUSTRIAL SOLDADOR.....	4
FIGURA 2.3. BRAZOS ROBÓTICOS INDUSTRIALES DE MONTAJE.....	4
FIGURA 2.4. CONFIGURACIONES MÁS FRECUENTES EN ROBOTS INDUSTRIALES.....	5
FIGURA 2.5. ANALOGÍA DEL BRAZO ROBÓTICO AL HUMANO.....	6
FIGURA 2.6. TIPOS DE ARTICULACIONES.....	6
FIGURA 2.7. VOLUMEN DE TRABAJO DE UN BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO ANGULAR.....	8
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	9
FIGURA 3.1. AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL	9
FIGURA 3.2. EJEMPLO DE UN ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS.....	10
CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO	11
FIGURA 4.1. ARTICULACIONES DEL BRAZO ROBÓTICO.....	11
FIGURA 4.2. ALCANCE DEL BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO.....	11
FIGURA 4.3. ALTURA MÁXIMA DEL BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO.....	12
FIGURA 4.4. FILAMENTOS DE PLÁSTICO ABS PARA IMPRESIÓN 3D	14
FIGURA 4.5. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL PLÁSTICO ABS.....	14
FIGURA 4.6. MENÚ DE IPROPERTIES DE AUTODESK INVENTOR.....	15
FIGURA 4.7. LOCALIZACIÓN SERVOMOTOR DE GIRO ROTATIVO EN LA BASE.....	15
FIGURA 4.8. LOCALIZACIÓN DEL SERVOMOTOR DE GIRO RELATIVO DEL BRAZO RESPECTO AL HOMBRO.....	15
FIGURA 4.9. LOCALIZACIÓN DEL SERVOMOTOR DE GIRO RELATIVO DEL ANTEBRAZO RESPECTO AL BRAZO.....	15
FIGURA 4.10. LOCALIZACIÓN DEL SERVOMOTOR DE GIRO ROTATIVO DEL GRIPPER.....	16
FIGURA 4.11. LOCALIZACIÓN DEL SERVOMOTOR DE ACCIONAMIENTO DE APERTURA Y CIERRE DEL GRIPPER.....	16
FIGURA 4.12. PARTES DE UN SERVOMOTOR.....	16
FIGURA 4.13. COLORES COMUNES DE LOS CABLES DE UN SERVOMOTOR.....	17
FIGURA 4.14. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SERVOMOTOR.....	17
FIGURA 4.15. SERVOMOTOR CYS S0650 PARA LA ARTICULACIÓN HOMBRO-BRAZO.....	18
FIGURA 4.16. SERVOMOTOR DS3225 PARA LA ARTICULACIÓN BRAZO-ANTEBRAZO Y GIRO DE LA BASE.....	18
FIGURA 4.17. SERVOMOTOR RD-5606HB-180 PARA EL GIRO DEL GRIPPER Y EL ACCIONAMIENTO DE LAS PINZAS.....	18
FIGURA 4.18. PARÁMETROS DEL PROTOTIPO VIRTUAL.....	19
FIGURA 4.19. MODELO 1 CON VARIACIÓN DE PARÁMETROS.....	20
FIGURA 4.20. MODELO 2 CON VARIACIÓN DE PARÁMETROS.....	20
CAPÍTULO 5: MODELADO.....	21

FIGURA 5.1. MODELADO DE LA BASE.....	21
FIGURA 5.2. MODELADO DE LA PLATAFORMA DEL HOMBRO.....	21
FIGURA 5.3. MODELADO DE LA FORMA DEL HOMBRO.....	22
FIGURA 5.4. PERFIL DE VACIADO DE MATERIAL DEL HOMBRO.....	22
FIGURA 5.5. MODELADO DEL HOMBRO.....	22
FIGURA 5.6. BOCETO DE LA FORMA DEL BRAZO.....	23
FIGURA 5.7. MODELADO DEL BRAZO.....	23
FIGURA 5.8. GENERACIÓN DE LA PRIMERA PARTE DEL ANTEBRAZO.....	24
FIGURA 5.9. ELIMINACIÓN DE MATERIAL EN EL ANTEBRAZO.....	24
FIGURA 5.10. EXTRUSIÓN DEL EXTREMO DEL ANTEBRAZO.....	24
FIGURA 5.11. MODELADO DEL ANTEBRAZO.....	25
FIGURA 5.12. MODELADO CONECTOR VISTA SUPERIOR.....	25
FIGURA 5.13. MODELADO CONECTOR VISTA INFERIOR.....	25
FIGURA 5.14. MODELADO DEL SOPORTE.....	26
FIGURA 5.15. EXTRUSIÓN FORMA BÁSICA DE LA CHAPA.....	26
FIGURA 5.16. LOCALIZACIÓN DE LAS OPERACIONES DE AGUJERO EN LA CHAPA.....	27
FIGURA 5.17. MODELADO DE LA CHAPA DEL GRIPPER.....	27
FIGURA 5.18. MODELADO DE LA BARRA DE ARTICULACIÓN.....	27
FIGURA 5.19. VENTANA DE DESIGN ACCELERATOR.....	28
FIGURA 5.20. ENGRANAJES GENERADOS MEDIANTE DESIGN ACCELERATOR.....	28
FIGURA 5.21. MODELADO DE LOS ENGRANAJES.....	29
FIGURA 5.22. BOCETO PINZA.....	29
FIGURA 5.23. MODELADO PINZA.....	29
FIGURA 5.24. MODELADO DE LOS PASADORES DEL GRIPPER.....	29
CAPÍTULO 6: ENSAMBLAJE.....	30
FIGURA 6.1. MENÚ DE RESTRICCIONES.....	30
FIGURA 6.2. PRIMERA PARTE DEL ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO.....	31
FIGURA 6.3. SEGUNDA PARTE DEL ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO.....	31
FIGURA 6.4. TERCERA PARTE DEL ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO.....	32
FIGURA 6.4. CUARTA PARTE DEL ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO.....	32
FIGURA 6.5. PRIMERA PARTE DEL ENSAMBLAJE DEL GRIPPER.....	32
FIGURA 6.6. ENSAMBLAJE GRIPPER.....	33
FIGURA 6.7. ENSAMBLAJE BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO.....	33
CAPÍTULO 7: SIMULACIÓN DINÁMICA.....	34
FIGURA 7.1. UNIÓN DE REVOLUCIÓN.....	34
FIGURA 7.2. INFORMACIÓN SOBRE LA SIMULACIÓN DINÁMICA.....	34
FIGURA 7.3. MENÚ DE PROPIEDADES DE LA UNIÓN.....	35
FIGURA 7.4. MOVIMIENTO PARA HALLAR EL PAR NECESARIO DE LA ARTICULACIÓN INFERIOR.....	36
FIGURA 7.5. MENÚ FUERZA DESCONOCIDA.....	36
FIGURA 7.6. GRÁFICO PAR DE TORSIÓN FRENTE A POSICIÓN DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO-BRAZO.....	37

FIGURA 7.7. SIMULACIÓN DINÁMICA CON UN PAR DE TORSIÓN CONSTANTE CONOCIDO.....	37
FIGURA 7.8. PAR DE TORSIÓN VARIABLE CON EL ÁNGULO.....	38
FIGURA 7.9. MOVIMIENTO PARA HALLAR EL PAR NECESARIO DE LA ARTICULACIÓN SUPERIOR.	39
FIGURA 7.10. GRÁFICO PAR DE TORSIÓN FRENTE A POSICIÓN DE LA ARTICULACIÓN BRAZO- ANTEBRAZO.	39
FIGURA 7.11. SALIDA DE DATOS FUERZA DESCONOCIDA DE LA ARTICULACIÓN BRAZO-ANTEBRAZO PARA MÁXIMA CARGA.	40
FIGURA 7.12. SALIDA DE DATOS FUERZA DESCONOCIDA DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO-BRAZO PARA MÁXIMA CARGA.	40
FIGURA 7.13. ELEVACIÓN DE LA CARGA.....	41
FIGURA 7.14. GIRO RELATIVO DEL HOMBRO RESPECTO DE LA BASE	41
FIGURA 7.15. DESCENSO DE LA CARGA.....	41
FIGURA 7.16. GRÁFICO DE POSICIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN DE CADA ARTICULACIÓN.....	41
FIGURA 7.17. GRÁFICO DE MOMENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE SIMULACIÓN DE CADA ARTICULACIÓN.....	42
CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE TENSIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS	43
FIGURA 8.1. GRÁFICA DE SALIDA DE LA SIMULACIÓN DINÁMICA DE LA SITUACIÓN MÁS DEFAVORABLE.....	43
FIGURA 8.2. MENÚ DE CONFIGURACIÓN DE MALLA POR DEFECTO.	44
FIGURA 8.3. MENÚ DE CONFIGURACIÓN DE MALLA MODIFICADO.....	44
FIGURA 8.4. MALLADO POR DEFECTO.....	44
FIGURA 8.5. MALLADO MODIFICADO.	44
FIGURA 8.6. CONFIGURACIÓN DE CONVERGENCIA PARA UN MÁXIMO DE 15 REFINADOS SIN CRITERIO DE PARADA.....	44
FIGURA 8.7. TRAZADO DE CONVERGENCIA PARA UN MÁXIMO DE 15 REFINADOS SIN CRITERIO DE PARADA.....	45
FIGURA 8.8. MENÚ DE CONFIGURACIÓN DE CONVERGENCIA.....	45
FIGURA 8.9. TRAZADO DE CONVERGENCIA PARA UN MÁXIMO DE 10 REFINADOS CON CRITERIO DE PARADA DEL 1%.	46
FIGURA 8.10. ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL BRAZO CON RANGO DE TENSIÓN DE LA BARRA DE COLORES POR DEFECTO.....	46
FIGURA 8.11. DETALLE DE LA ZONA MÁS SOLICITADA.	47
FIGURA 8.12. ANÁLISIS DE TENSIÓN CON TENSIÓN MÁXIMA IMPUESTA POR EL MATERIAL.....	47
CAPÍTULO 9: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE MEJORA	48
FIGURA 9.1. EJEMPLO SIMPLIFICADO DE ARTICULACIÓN CON TRANSMISIÓN MEDIANTE ENGRANAJES.....	48
FIGURA 9.2. SALIDA DE DATOS FUERZA DESCONOCIDA DE LA ART. HOMBRO-BRAZO PARA MÁXIMA CARGA CON UN SERVO DE 70KGFCM.	50
FIGURA 9.3. ANTEBRAZO CON ESPESOR REDUCIDO.	51
FIGURA 9.4. BRAZO CON ESPESOR REDUCIDO.....	51

FIGURA 9.5. GRÁFICO DE COMPARACIÓN EN LA CURVA DE PAR DE TORSIÓN PARA UNA CARGA DE 315 GRAMOS.....	51
FIGURA 9.6. TRAZADO DE CONVERGENCIA DEL ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL PROTOTIPO VIRTUAL MODIFICADO.	52
FIGURA 9.7. ANÁLISIS DE TENSIÓN DEL PROTOTIPO VIRTUAL MODIFICADO.	52

ÍNDICE DE TABLAS DE LA MEMORIA

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS SEGÚN GENERACIONES	3
TABLA 2. TABLA DE CÁLCULOS DEL PESO DEL PROTOTIPO VIRTUAL.	13
TABLA 3. ESPECIFICACIONES DE LOS SERVOMOTORES.	18
TABLA 4. DISTRIBUCIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO DE PARÁMETROS.....	18
TABLA 5. VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL PROTOTIPO VIRTUAL.	19

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

PRESUPUESTO	1
-------------------	---

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO Nº 1: CONJUNTO BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO	1
PLANO Nº 2: BASE	2
PLANO Nº 3: HOMBRO	3
PLANO Nº 4: ANTEBRAZO Y BRAZO	4
PLANO Nº 5: SUBCONJUNTO GRIPPER.....	5
PLANO Nº 6: CONECTOR, SOPORTE Y BARRA DE ARTICULACIÓN	6
PLANO Nº 7: CHAPA GRIPPER	7
PLANO Nº 8: PINZA Y PASADORES	8
PLANO Nº 9: ENGRANAJES RECTOS 1 Y 2.....	9

MEMORIA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es poder poner en práctica aquellos conocimientos adquiridos en las asignaturas cursadas durante el Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, pudiendo así converger en el diseño y desarrollo de un prototipo para poder analizar posteriormente su operatividad.

Por otra parte, de forma más específica se va a buscar la profundización en los conocimientos de diseño virtual. Mediante la herramienta de Autodesk Inventor se tendrá la oportunidad de adentrarse en el diseño, modelado, parametrización, ensamblaje, realización de planos, simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos, completando así el ciclo básico de diseño virtual de un producto.

Finalmente, es importante no olvidar todo lo que se aprenderá del diseño de este proyecto, aunque no sea a nivel técnico. Detrás de todo trabajo, hay un gran proceso de investigación que deriva en un análisis exhaustivo de información, dando al alumno la oportunidad de sintetizar lo aprendido y expresarlo de manera efectiva.

1.2. ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance del proyecto comienza con un proceso de búsqueda de información, para poder hacer así una primera aproximación del diseño. Posteriormente se realizará un modelado parametrizado, de forma que exista la opción de variar sus dimensiones para obtener el alcance más apropiado. Una vez modeladas todas las piezas del prototipo virtual se ensamblará el conjunto y se realizarán los planos.

Tras desarrollar el prototipo mediante la herramienta Autodesk Inventor, se procederá a la simulación dinámica, donde se hallará el par máximo necesario en cada articulación; y al análisis mediante elementos finitos en la pieza más solicitada. A partir de los datos obtenidos en la simulación se comprobará el correcto funcionamiento del modelo y se propondrán modificaciones para solucionar problemas o mejorar sus prestaciones.

Finalmente, una vez finalizado el diseño virtual se obtendrán conclusiones a partir de los datos obtenidos y se valorará si ha sido posible conseguir todos los objetivos aquí marcados.

CAPÍTULO 2: EL BRAZO ROBÓTICO

2.1. HISTORIA

El origen de esta rama de la robótica se remonta a principios del siglo XX, cuando Bill Taylor diseñó un robot grúa que era capaz de apilar bloques de madera, dando así el primer paso hacia la automatización de robots de *pick and place* (Coger y colocar). Fue poco después cuando empezaron a construirse robots industriales que se asemejaban ya a la figura del brazo robótico.

Sin embargo, no fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando George Devol comenzó con el diseño del primer robot programable con el fin de resolver tareas sencillas mediante un robot que fuera fácil de manejar y que pudiera trabajar de forma automática, creando así lo que se conoce hoy como brazo robótico [5][6].

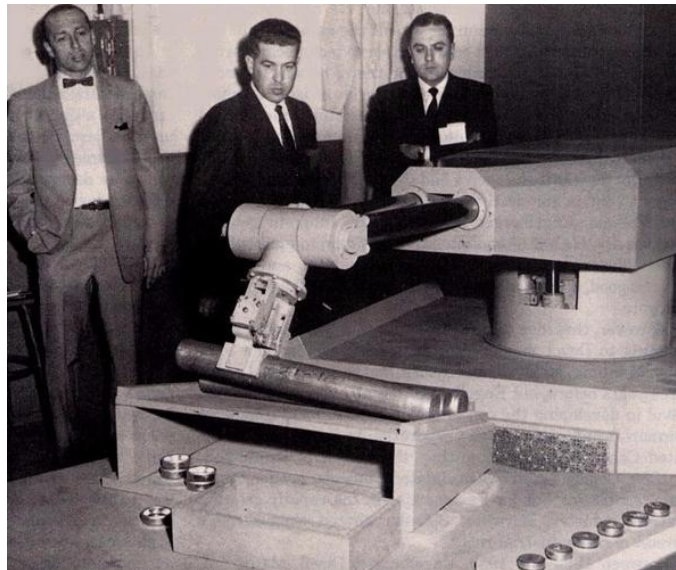


Figura 2.1. Primer robot programable de George Devol

[Fuente: <https://assets.sutori.com/user-uploads/image/45c24998-61c1-4251-8d4c-dc6e1833677d/0f2fe67e23c3ad6e5bfd9b5aba159067.jpeg>]

Gracias a los avances tecnológicos desde la creación de George Devol, los brazos robóticos se han extendido a nivel mundial y forman gran parte de las cadenas de montaje y de la fabricación a nivel industrial, dando así la oportunidad a la sociedad de dar un paso más hacia la automatización de los procesos de fabricación.

2.2. DISTINTAS CLASIFICACIÓN DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS

2.2.1. GENERACIÓN

La generación hace referencia al momento histórico al que pertenece cierta tecnología propia de los robots industriales. El paso de una generación a otra se da cuando se produce un avance sustancial que genera una diferencia marcada entre la capacidad tecnológica de un robot a otro de la anterior generación.

Tabla 1. Clasificación de los robots según generaciones

1ª Generación	Se programa una tarea que el robot realizará continuamente, siendo incapaz de percibir alteraciones en el área de trabajo.
2ª Generación	Es capaz de percibir cierta información sobre su entorno que le permite localizar, clasificar y realizar los movimientos necesarios para la tarea.
3ª Generación	Otorga la posibilidad de planificar tareas de forma automática mediante el empleo de un lenguaje de programación.

Cronológicamente, la primera generación se extiende desde los inicios de la robótica hasta aproximadamente los años ochenta. A partir de ahí y hasta prácticamente la actualidad se corresponde la segunda generación, que es la tecnología que puede encontrarse en la mayoría de las industrias a día de hoy. Los últimos años y el futuro cercano engloban la tercera generación, en la que se espera un avance tecnológico [3].

2.2.2. AREA DE APLICACIÓN

A continuación se enlistan las distintas áreas de aplicación posibles para un robot industrial manipulador [3]:

- Manipulación en fundición.
- Manipulación en moldeo de plásticos.
- Manipulación en tratamientos térmicos.
- Manipulación en la forja y estampación.
- Soldadura.
- Aplicación de materiales.
- Mecanización.
- Montaje.
- Paletización y empaquetado.
- Control de calidad.
- Manipulación de materiales.
- Formación enseñanza e investigación.
- Otros

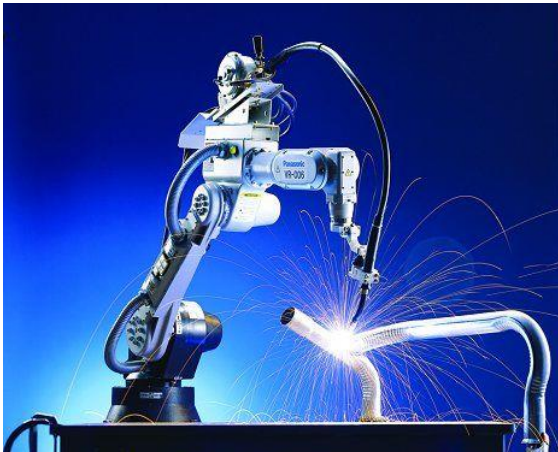


Figura 2.2. Brazo robótico industrial soldador.

[Fuente: <https://rivasrobotics.com/wp-content/uploads/2017/06/Robot-industrial-soldador.jpg>]



Figura 2.3. Brazos robóticos industriales de montaje.

[Fuente: <https://logismarketes.cdnwm.com/im/3956960201-1669970-700x400.jpg>]

2.2.3. CONFIGURACIÓN

- Robot Cartesiano** Se caracteriza por el movimiento lineal en los 3 ejes cartesianos. Gracias a esta configuración el robot puede actuar con gran precisión y velocidad, pudiendo soportar una gran capacidad de carga en un amplio espacio de trabajo. Presenta una mala relación de espacio ocupado por el robot y volumen de trabajo, puesto que suelen tener grandes dimensiones. Son especialmente eficaces para aquellos trabajos de alta precisión que dispongan de un zona de trabajo plana.
- Robot Cilíndrico** Este robot dispone de una base rotacional y de dos ejes perpendiculares que le permiten un movimiento lineal a través de ellos. Gracias al eje rotacional, el robot cilíndrico dispone de una mayor maniobrabilidad y velocidad de la que puede alcanzar el robot cartesiano. Es importante que la zona de trabajo esté libre de obstáculos y que el acceso al punto de trabajo se haga mediante una aproximación horizontal.
- Robot esférico o polar** Dispone de dos ejes rotacionales perpendiculares y un eje que permite un movimiento lineal. Debido a esta configuración, proporciona una mejor accesibilidad y capacidad de carga que los robots mencionados anteriormente. Debido a que dispone únicamente de un movimiento lineal, genera problemas cuando se requieren movimientos de traslación. Como soporta cargas muy pesadas, a medida que el brazo se extiende, su precisión disminuye sustancialmente, por lo que se suele utilizar para operaciones con movimientos sencillos.

Robot SCARA

Está constituido por un eje lineal que posibilita un movimiento vertical y dos ejes rotacionales paralelos entre sí. Este robot posee una gran velocidad y precisión. Siempre y cuando la complejidad de los movimientos no sea especialmente elevada suele utilizarse para operaciones de empaquetado o ensamblaje.

Robot angular o antropomórfico

Comúnmente denominado articular, este robot dispone de tres ejes rotacionales, siendo el que se sitúa en la base, perpendicular al suelo y los otros dos ejes, perpendiculares a éste. Destaca por su gran habilidad para esquivar obstáculos y para realizar maniobras complicadas. Además el espacio que ocupa es muy reducido en comparación con el gran alcance que posee. Es por estas razones que es el robot más extendido a nivel industrial [11].

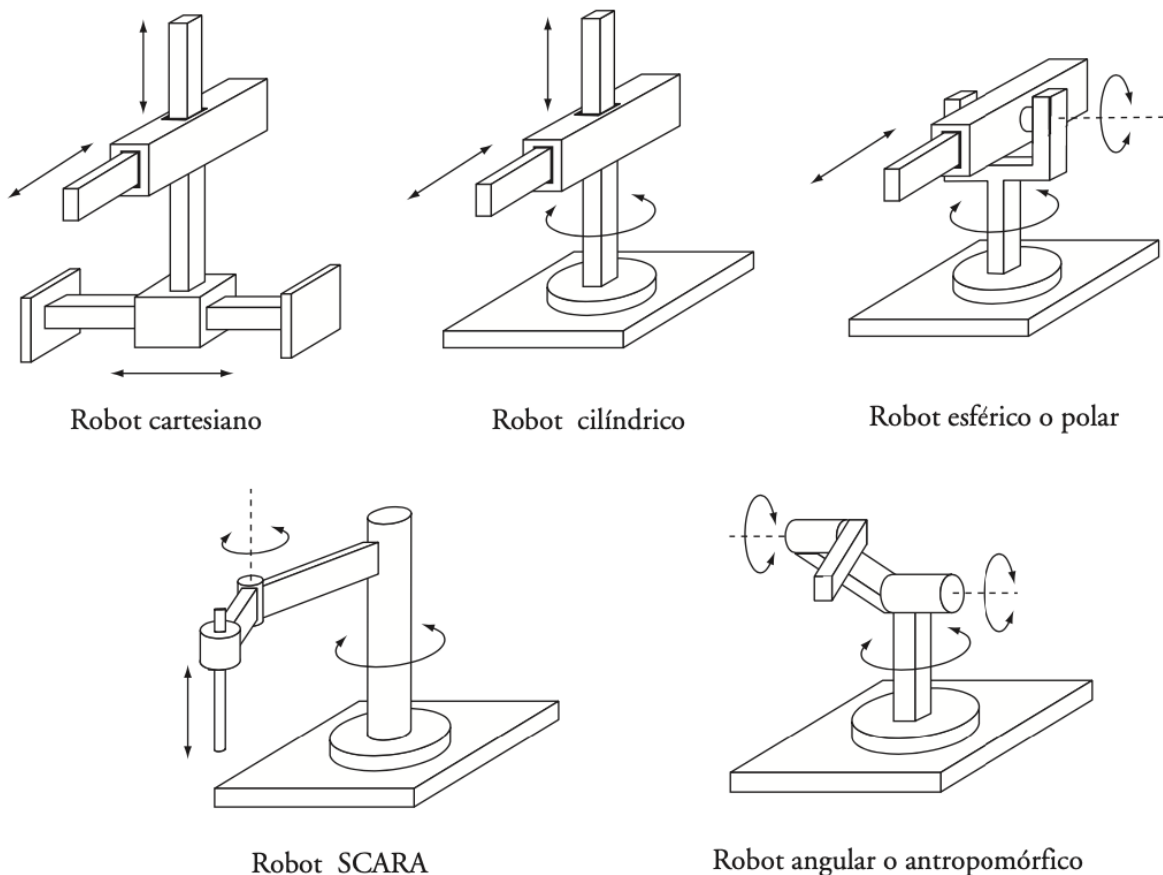


Figura 2.4. Configuraciones más frecuentes en robots industriales.

[Fuente: Fundamentos de Robótica. McGraw Hill.]

2.3. ESTRUCTURA MECÁNICA

La estructura mecánica está formado por piezas unidas mediante articulaciones. Generalmente los elementos que componen el brazo robótico pueden dividirse en 4 partes: cuerpo, brazo, antebrazo y mano; y las articulaciones podrían identificarse como: cintura, hombro, codo y muñeca. Como se puede apreciar, las partes del robot son similares a los componentes de un brazo humano, esto se debe a que los brazos robóticos se crearon con la finalidad de que fueran semejantes a la constitución física humana [8].

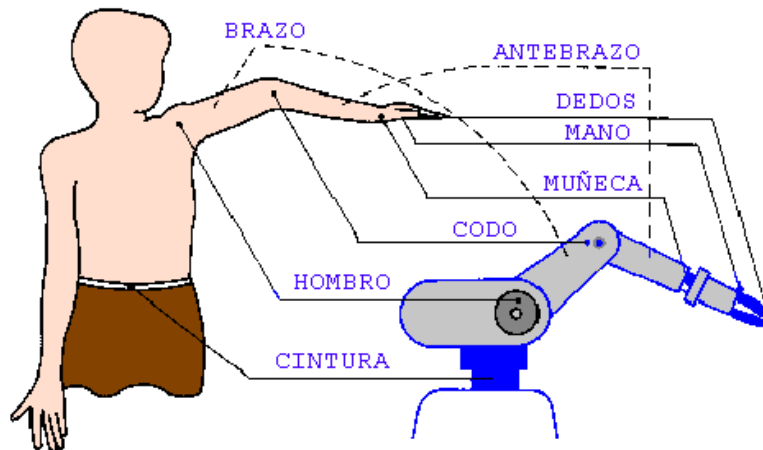


Figura 2.5. Analogía del brazo robótico al humano.

[Fuente: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/images/morfol39.gif]

Cada articulación del brazo puede ser de desplazamiento, giro, o una combinación de ambos. Una articulación es un movimiento relativo que se realiza entre dos elementos que tienen un contacto superficial.

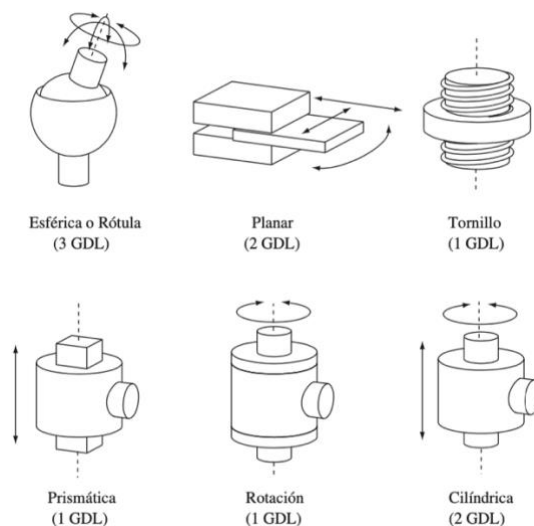


Figura 2.6. Tipos de articulaciones.

[Fuente: Fundamentos de Robótica. McGraw Hill.]

Dependiendo de la configuración de cada articulación, dispondrá de un número determinado de grados de libertad, que es cada movimiento independiente capaz de realizar una articulación respecto de la anterior. En la práctica, las dos articulaciones más utilizadas son la prismática y la rotacional, que disponen únicamente de un grado de libertad. Cualquier articulación con más de un grado de libertad, de forma simplificada, será una combinación de articulaciones prismáticas y/o rotacionales [3].

Estas uniones tomarán un significado más importante cuando se llegue al capítulo de Simulación Dinámica, donde se verá el sentido que toman las articulaciones como uniones mecánicas para definir los movimientos relativos y grados de libertad entre los elementos de un conjunto.

2.4. ESPECIFICACIONES PRINCIPALES DE UN BRAZO ROBÓTICO

2.4.1. GRADOS DE LIBERTAD

Comúnmente en este tipo de robots, las articulaciones de las que dispone suelen ser de un grado de libertad (GDL), es por esto que de forma genérica se puede asumir que los grados de libertad de los brazos robóticos son iguales a sus articulaciones. Estos grados de libertad pueden entenderse como los desplazamientos y giros que es capaz de hacer cada articulación de forma independiente. Son este conjunto de parámetros los que se necesitan para conocer finalmente la posición y orientación del extremo del brazo, el cual es el encargado de realizar la tarea asignada mediante el actuador correspondiente.

Cuanto mayor sea el número de grados de libertad, se incrementará la flexibilidad y opciones de movimiento del robot. Es por esto que para realizar la mayoría de tareas se necesitan 6 GDL, sin embargo cuando se traten de tareas sencillas existe la posibilidad de que haya robots de 4 o 5 GDL capacitados para realizarlas. Cuando un robot tenga más grados de libertad de los necesarios para realizar una tarea, se denominará a éste como redundante [3][8].

2.4.2. VOLUMEN DE TRABAJO

Los grados de libertad junto a los elementos del robot son los que definen el espacio de trabajo, lo cual significa que se genera un volumen cerrado no visible que engloba el espacio accesible por el extremo de la muñeca del brazo robótico. Cuando se consulta el volumen de trabajo de un brazo robótico industrial es importante tener en consideración que no se tiene en cuenta el actuador para el cálculo, pues se asume generalmente que no se va a utilizar siempre el mismo actuador.

Dependiendo del modelo de robot, el volumen de trabajo puede variar. Existen robots con espacios de trabajos regulares, como podrían ser los robots cartesianos o de configuración cilíndrica, sin embargo el prototipo de robot virtual que se ha diseñado en este Trabajo de Fin de Grado se trata de un robot angular, también conocido como articular, el cual tiene como característica que posee un volumen de trabajo irregular que podría asemejarse a una esfera incompleta [3][8].

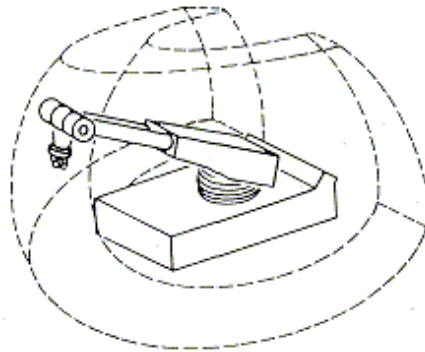


Figura 2.7. Volumen de trabajo de un brazo robótico articulado angular.

[Fuente: http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/images/morfol48.gif]

2.4.3. PRECISIÓN

Hay 3 factores que influyen directamente a la precisión:

El primero es la resolución espacial, se trata del incremento más reducido de movimiento que es capaz de hacer el robot, o lo que es lo mismo, la mínima distancia que es capaz de recorrer el robot si se da la orden de movimiento. La resolución depende así mismo de otros dos factores: el control del sistema, que va en función de la cantidad de almacenamiento del sistema, y las limitaciones mecánicas, ya que la calidad de los materiales de los robots no es una constante.

El segundo factor es la exactitud, la cual se define por su capacidad de situar el extremo de su muñeca en un lugar marcado. Ésta decrece a medida que se aleja el brazo del cuerpo, por lo que se encontrará a su nivel mínimo cuando la extensión del brazo robótico sea completa. Tiene una gran dependencia de la resolución espacial, por lo que si la primera es reducida, ésta también lo será.

El último factor es la repetibilidad, que consiste en la capacidad que tiene un brazo de repetir un mismo movimiento con exactitud al haber recibido una misma orden. Debido a la dependencia de este factor hacia la exactitud y a su vez la que tiene ésta a la resolución, se puede asumir que para tener una precisión adecuada, todos los factores tienen que permitir el mínimo margen de error ya que existe una fuerte correlación entre los tres [3][8].

2.4.4. CAPACIDAD DE CARGA

A la hora de escoger el robot más adecuado para realizar una tarea, la capacidad de carga suele ser el factor decisivo, pues se trata del peso máximo que puede sostener el actuador del brazo robótico. El límite máximo de peso vendrá limitado por la resistencia máxima de los materiales que componen la estructura del robot y a su vez de la robustez y el diseño de la misma [3][8].

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. AUTODESK INVENTOR

Autodesk Inventor es una herramienta de CAD 3D para ingeniería. Este programa dispone de una interfaz intuitiva que permite realizar un modelado paramétrico con posibilidad de introducir información del fabricante en el modelo. Además, puede observarse la composición del diseño y funcionamiento en el conjunto mediante el modelado de ensamblaje, incluyendo un amplio centro de contenido de piezas normalizadas disponibles para el conjunto.

En la línea del diseño de producto, esta herramienta consta de una interfaz de creación de planos precisos y detallados que destacan por su fácil y rápida creación, ya que se realizan a partir de las piezas y conjuntos modelados, lo cual otorga grandes ventajas en el mundo de la fabricación.

Por último, Inventor ofrece opciones de simulación tales como la simulación dinámica, que permite aplicar fuerzas sobre un conjunto con el objetivo de evaluar el movimiento; el análisis de tensión, con el fin de realizar comprobaciones rápidas sobre las piezas; y las vistas explosionadas y animaciones que ayudan a proporcionar una imagen más visual y clara del producto [2].



Figura 3.1. Autodesk Inventor Professional

[Fuente: <https://www.creativetools.no/image/cache/catalog/product/autodesk/inventor-professional/autodesk-inventor-professional-1280x720.jpg>]

3.2. ELEMENTOS FINITOS

Este método matemático está muy extendido en los softwares de ingeniería ya que mediante una simulación computacional es capaz de obtener respuestas para numerosos problemas de esta rama de la industria.

La base de este método radica en someter a la geometría de la pieza seleccionada a cargas y restricciones para después dividirla en pequeños componentes, lo cual provoca que un problema de complejidad elevada se transforme en varios problemas más sencillos. El dominio queda dividido en un número finito de elementos bien definidos, conectados entre sí mediante unos puntos llamados nodos. Al conjunto de elementos unidos por nodos se le denomina mallado, el cual definirá la precisión del cálculo, pues la precisión de éstos se basará en el tamaño de la malla, de forma que cuanto menor sea el mallado, mayor será la precisión de los cálculos en el análisis.

En esta metodología de cálculo no se obtiene una solución exacta, lo que se consigue es el valor más aproximado en cada nodo, es por esto que al aumentar el número de elementos finitos, o lo que es lo mismo, disminuir el mallado, se obtiene cada vez una solución más exacta.

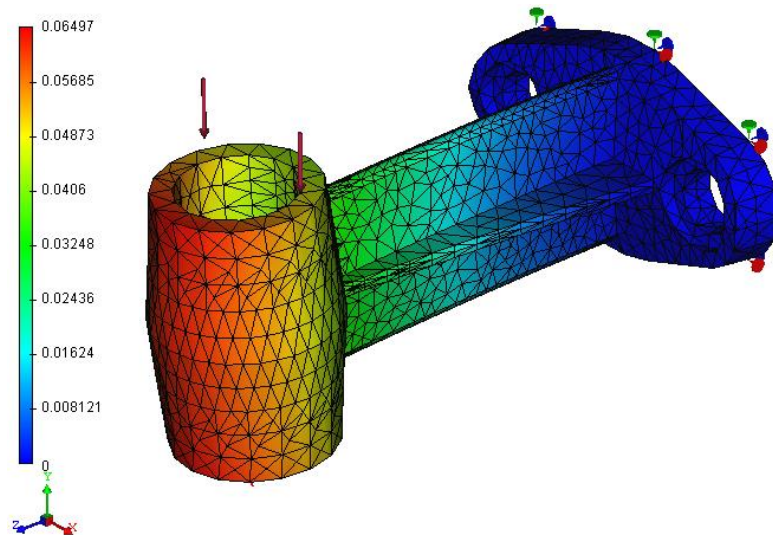


Figura 3.2. Ejemplo de un análisis mediante elementos finitos.

[Fuente: <https://autofem.com/images/stories/en/comparison/tutor1-11.png>]

Como puede verse, el uso de este método ofrece una solución visual muy clara que permite identificar con facilidad los posibles problemas que podría presentar la pieza durante su vida útil, es por esto que la extensión de este método en la industria ha supuesto un gran cambio a nivel preventivo.

Este método encuentra su aplicación principalmente en la resolución y diagnóstico de problemas, para así obtener los desplazamientos, deformaciones y tensiones en una pieza, además de poder aplicar criterios de rigidez, fatiga o resistencia. Además destaca por su versatilidad para ser fácilmente adaptable para problemas de campo electromagnético, mecánica de fluidos y transmisión de calor [9][10].

CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO

4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROTOTIPO VIRTUAL

4.1.1. GRADOS DE LIBERTAD

Para el diseño de este prototipo virtual, se ha optado por realizar un brazo robótico articulado angular con 5 grados de libertad, ya que de esta forma es posible realizar las operaciones de *pick & place* para las que ha sido ideado. A continuación se muestran los movimientos disponibles del robot:

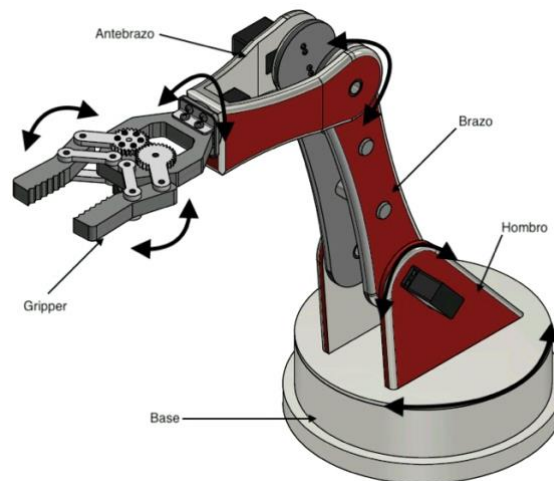


Figura 4.1. Articulaciones del brazo robótico.

- Giro rotativo del hombro.
- Giro relativo del brazo respecto del hombro.
- Giro relativo del antebrazo respecto del brazo.
- Giro rotativo del *gripper*.
- Apertura y cierre del *gripper*.

4.1.2. ALCANCE Y AREA DE TRABAJO

Antes de calcular el área de trabajo, hay otro parámetro de interés a conocer: el alcance aproximado del que dispone el brazo robótico. En un principio, esto dependerá de la naturaleza del objeto y de dónde se encuentre, pero de forma aproximada para poder realizar los cálculos correspondientes, se supondrá que el objeto se halla a nivel del suelo.

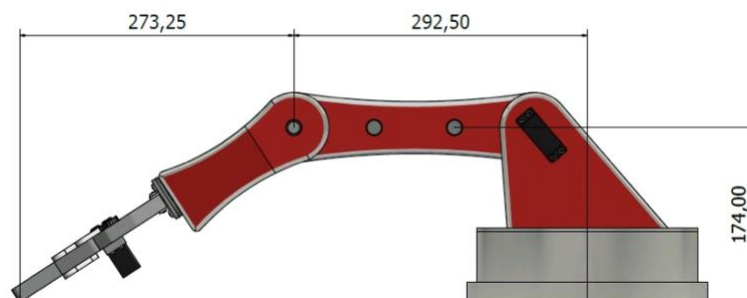


Figura 4.2. Alcance del brazo robótico articulado.

Es sencillo observar que el máximo alcance radial que puede obtenerse con este prototipo es de 565,75 mm aproximadamente.

Como se comentó en la introducción teórica previa, a un brazo articulado angular le corresponde un área de trabajo irregular que puede aproximarse a una esfera. Para poder simplificar el cálculo, se asumirá que el robot tiene un volumen de trabajo de un cuarto de esfera perfecta, ya que hay que tener en cuenta que de forma aproximada el área abarcada será únicamente la parte superior de la esfera y el movimiento que puede realizar es únicamente de 180°. De esta forma, para poder realizar los cálculos, lo único que se necesitará conocer es la altura útil máxima de la que dispone el prototipo.

Como excepción para este cálculo se incluirá la altura que añade el gripper, pues no se va a realizar ningún cambio de actuador para este prototipo virtual. Sin embargo no hay que olvidar que en caso de que el diseño estuviera ideado para funcionar con distintos tipos de actuadores, la altura con la que habría que realizar los cálculos incluiría únicamente hasta el extremo del antebrazo donde se sitúa la muñeca.

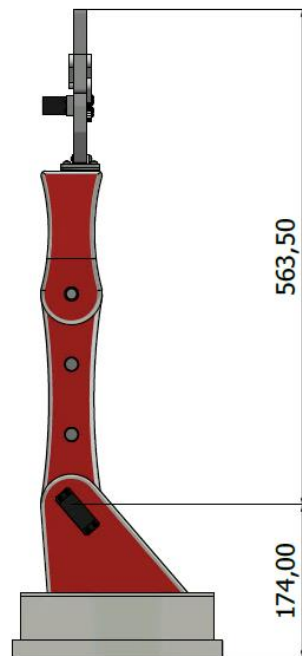


Figura 4.3. Altura máxima del brazo robótico articulado.

Utilizando la siguiente expresión para el cálculo se obtiene el área de trabajo:

$$V_{trabajo} = \frac{1}{3}\pi r^3 \tag{1}$$
$$V_{trabajo} = \frac{1}{3}\pi \cdot (563,5) = 187374453,5mm^3 = 0,1874m^3$$

4.1.1. CARGA MÁXIMA

La carga máxima que será capaz de soportar este brazo robótico articulado para garantizar su correcto funcionamiento es de 315 gramos. Más adelante en el capítulo de Simulación Dinámica se comentará con más detalle los pasos seguidos para obtener este límite superior.

4.1.1. GEOMETRÍA DE LOS OBJETOS

Como se verá posteriormente con más detalle en el capítulo de Modelado, las pinzas disponen de una superficie irregular de contacto con pequeños dientes para mejorar el agarre a los objetos. Principalmente ha sido diseñado para poder transportar objetos de geometría sencilla, como puede ser la rectangular o cilíndrica, ya que para figuras más irregulares el diseño de la pinza debería ser más complejo.

4.1.1. PESO DEL CONJUNTO

Tabla 2. Tabla de cálculos del peso del prototipo virtual.

PIEZA	PESO POR PIEZA (g)	CANTIDAD (uds)	PESO TOTAL (g)
Base	752	1	752
Hombro	676	1	676
Brazo	178	2	356
Antebrazo	216	1	216
Conector	2	1	2
Soporte	7	2	14
Chapa	80	1	80
Engranaje	7	2	14
Barra de articulación	3	4	12
Pinza	30	2	60
Pasador \varnothing 5x10mm	0,5	1	0,5
Pasador \varnothing 5x20mm	0,75	2	1,5
Pasador \varnothing 5x25mm	1	4	4
Servomotor CYS S0650	202	1	202
Servomotor DS3225	67	2	134
Servomotor RD-5606HB-180	47	2	94
ISO 7045 - M4 x 6 - 4.8 - H	0,8	4	3,2
ISO 7045 - M3 x 8 - 4.8 - H	0,4	20	8
ISO 7045 - M2,5 x 8 - 4.8 - H	0,2	4	0,8
ISO 7045 - M2,5 x 12 - 4.8 - H	0,3	8	2,4
ISO 7045 - M4 x 20 - 4.8 - H	1	2	2
ISO 7045 - M2,5 x 5 - 4.8 - H	0,1	4	0,4
ISO 7045 - M2,5 x 6 - 4.8 - H	0,15	6	0,9
ISO 2795 - 12 x 16 x 20	2	2	4
ISO 2338 - 16 h8 x 65	14	2	28
TOTAL			2667,7

El peso del conjunto es de 2,67Kg, es sencillo observar de esta forma que se trata de un prototipo virtual reducido.

4.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Este brazo robótico ha sido diseñado para poder materializarse mediante una impresora 3D. El material utilizado para las piezas modeladas del prototipo ha sido plástico ABS, ya que destaca junto con el plástico PLA por ser los más utilizados en la impresión 3D.

Este plástico ha sido desarrollado principalmente en los últimos 30 años y se obtiene mediante la polimerización de acrilonitrilo y estireno en presencia de butadieno, de forma que puede modificarse las propiedades del material variando las cantidades en la composición del plástico.

Aunque no es el plástico más fácil de imprimir, el ABS destaca por su alta resistencia a impactos y por su amplio rango de temperaturas de trabajo. Además, es uno de los plásticos más ligeros del mercado, lo cual se ha priorizado en este Trabajo de Final de Grado ya que se ha buscado reducir el peso del conjunto al mínimo para poder así reducir el par máximo en las articulaciones y no sobrecargar los servomotores encargados del accionamiento [4].



Figura 4.4. Filamentos de plástico ABS para impresión 3D

[Fuente: <https://e7.pnggg.com/pngimages/666/696/png-clipart-plastic-3d-printing-filament-acrylonitrile-butadiene-styrene-6-pack-abs-engineering-3d-printing.png>]

Alargamiento a la Rotura (%) <i>Elongation at break (%)</i>	45
Coefficient de Fricción <i>Coefficient of friction</i>	0,5
Módulo de Tracción (GPa) <i>Tensile modulus (GPa)</i>	2,1-2,4
Resistencia a la Tracción (MPa) <i>Tensile strength (MPa)</i>	41-45
Resistencia al Impacto Izod (J m ⁻¹) <i>Izod impact strength (J m⁻¹)</i>	200-400
Absorción de Agua - en 24 horas (%) <i>Water absorption - over 24 hours (%)</i>	0.3-0.7
Densidad (g cm ⁻³) <i>Density (g cm⁻³)</i>	1,05
Resistencia a la Radiación <i>Radiation resistance</i>	Acceptable <i>Fair</i>
Resistencia a los Ultra-violetas <i>Resistance to Ultra-violet</i>	Mala <i>Poor</i>

Figura 4.5. Propiedades físico-mecánicas del plástico ABS.

[Fuente: <http://www.siiim.com/docs/RAE-1018.pdf>]

4.2.1. ESPECIFICACIÓN DEL MATERIAL EN AUTODESK INVENTOR

Para las simulaciones que se realizarán posteriormente, es preciso que todas las piezas del conjunto tengan sus especificaciones correctamente definidas, pues el peso de cada pieza y su resistencia van a ser claves en los análisis que se van a realizar.

Autodesk Inventor dispone de un menú denominado “*iProperties*”, dónde en la sección de Propiedades Físicas puede especificarse el material del que está compuesta la pieza en cuestión.

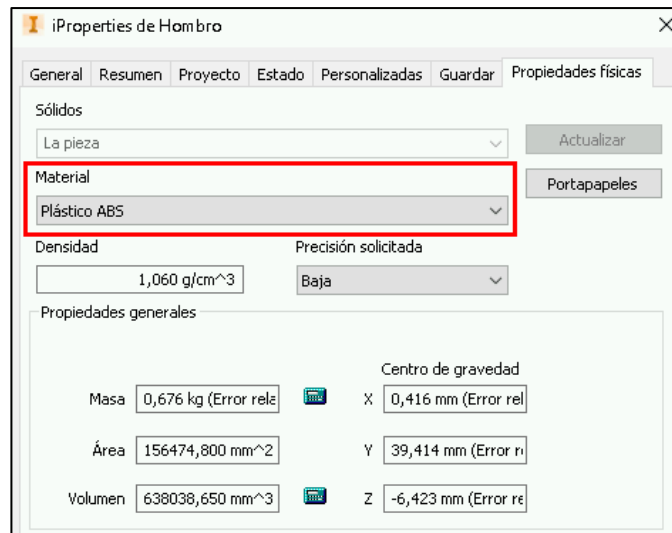


Figura 4.6. Menú de *iProperties* de Autodesk Inventor

4.3. DISEÑO DE LAS ARTICULACIONES

Dado el tamaño y peso del brazo robótico, el robot ha sido diseñado para que el movimiento de las articulaciones se realice mediante transmisión directa con servomotores. Sin embargo, en el capítulo de Análisis de Resultados se comentarán posibles variaciones de las articulaciones mediante transmisiones con engranajes para reducir el par máximo.

Como se comentó ya anteriormente en el apartado de especificaciones técnicas; el brazo consta de 5 grados de libertad, lo que supone que serán necesarios 5 servomotores para poder realizar todos los movimientos que requiere el diseño. Se muestra a continuación la localización de estos servos:

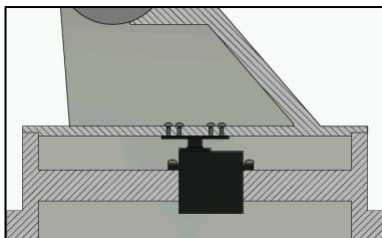


Figura 4.7. Localización servomotor de giro rotativo en la base.

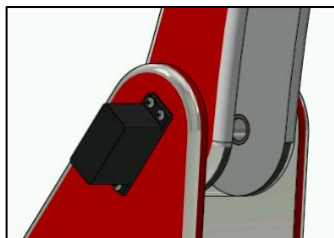


Figura 4.8. Localización del servomotor de giro relativo del brazo respecto al hombro.

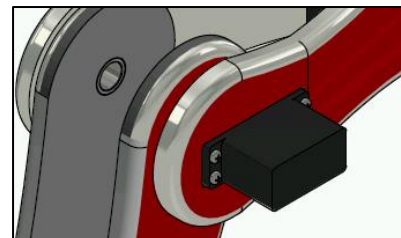


Figura 4.9. Localización del servomotor de giro relativo del antebrazo respecto al brazo.

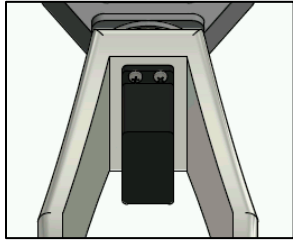


Figura 4.10. Localización del servomotor de giro rotativo del gripper.

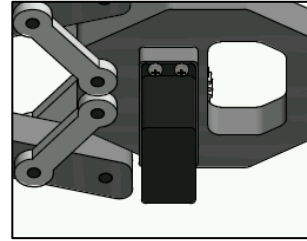


Figura 4.11. Localización del servomotor de accionamiento de apertura y cierre del gripper.

4.3.1. FUNCIONAMIENTO DE LOS SERVOMOTORES

La característica especial de este tipo de motor es que permite realizar un control del giro de forma que es posible controlar la posición del eje. Esto se debe a la composición de este sistema, ya que consta de un circuito de control que se encarga de controlar la posición y movimiento del motor DC que se halla dentro del servo. El eje del motor está acoplado a una serie de engranajes que permiten una transmisión que potencia el par del motor, lo cual permite mantener una posición fija cuando sea necesario.

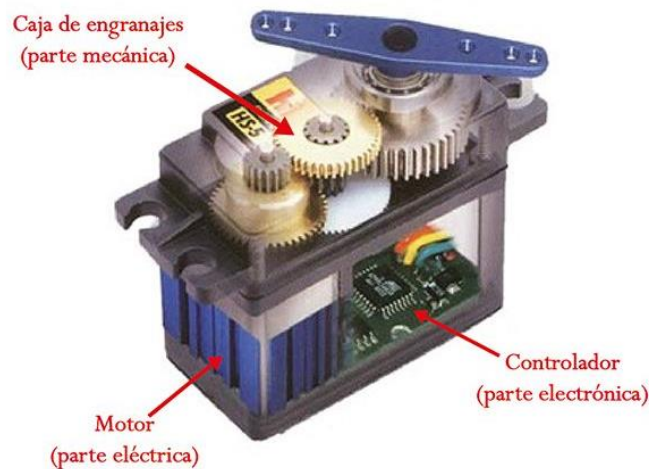


Figura 4.12. Partes de un servomotor.

[Fuente: <http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>]

Generalmente los servos pueden clasificarse en dos grupos atendiendo al tipo de giro que pueden realizar:

- Servomotores de rango de giro limitado: No pueden realizar una vuelta completa y generalmente tienen una restricción de 180° para sus maniobras.
- Servomotores de rotación continua: Tiene las características de un motor convencional, pudiendo realizar giros de 360° pero con la característica de poder variar su velocidad y posición cuando se requiera.

A diferencia de los motores comunes, que suelen disponer solo de dos cables, los servos tienen tres, los cuales suelen seguir el mismo código de colores de forma que sean fácilmente reconocibles.




Voltaje positivo	Tierra (ground)	Señal de control
		

Figura 4.13. Colores comunes de los cables de un servomotor.

[<http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>]

Este cable adicional se debe a la necesidad de añadir una señal de control modulada, para la cual se utiliza modulación por ancho de pulso (PWM). De forma que como se ha comentado anteriormente será necesario un circuito de control que sea capaz de recibir esta señal y dar las ordenes indicadas al motor DC [6].

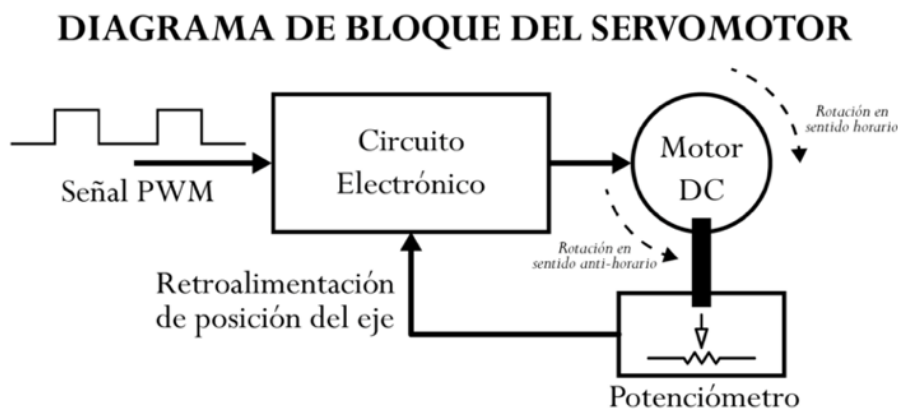


Figura 4.14. Diagrama de bloques de un servomotor.

[<http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>]

4.3.2. ELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES

En el capítulo de Simulación Dinámica donde se ha estudiado el par necesario en las articulaciones para levantar una carga dada, se ha identificado la fuerza mínima por cm necesaria para las articulaciones hombro-brazo y brazo-antebrazo y se ha explicado el criterio de selección de los servomotores correspondientes.

Para el servomotor ubicado en la base se ha decidido escoger el mismo que se ubica en la articulación brazo-antebrazo ya que de esta forma en caso de avería no existe tanta variedad de servomotores y la velocidad del servo es adecuada para el movimiento que se genera en la base.

Para las otras 2 articulaciones, ya que se necesita una fuerza muy reducida para su accionamiento se ha elegido un servomotor que ofrece un par de 5,5kgf*cm cuando esta alimentado a 4,8V y 6,2kgf*cm a 6V.

Cabe destacar que todos los servomotores escogidos son de rango de giro limitado, lo cual es un factor crucial a tener en cuenta cuando se comente posteriormente en el capítulo de Análisis de Resultados el rediseño de las articulaciones mediante engranajes.



Figura 4.15. Servomotor CY5 S0650 para la articulación hombro-brazo.

[Fuente:
<https://img.tttcdn.com/product/original/p/gu1/R/3/RM10293/RM10293-1-ce28-KUEj.jpg>]



Figura 4.16. Servomotor DS3225 para la articulación brazo-antebrazo y giro de la base.

[Fuente:
<https://es.aliexpress.com/item/32906806020.html>]



Figura 4.17. Servomotor RD-5606HB-180 para el giro del gripper y el accionamiento de las pinzas.

[Fuente:
https://www.3dxc.co.uk/images/jx-servo-jx-rd-5606hb-180-6kg-180-degree-servo-p3619-5338_image.jpg]

Tabla 3. Especificaciones de los servomotores.

[Fuente: es.banggood.com]

Modelo	Voltaje (V)	Velocidad (seg/60º)	Par (kg.cm)	Tamaño (mm)	Peso (g)	Rango de giro (º)
CYS S0650	6V-7,4V	0,13-0,11	45-55	66x30x56	202	180±1
DS3225	4,8V-6V	0,15-0,13	21-25	40x20x40,5	67	180±1
RD-5606HB-180	4,8V-6V	0,14-0,12	5,5-6,2	40,5x20,3x40	47	180±2

4.4. PARAMETRIZACIÓN

El modelado paramétrico es una forma sencilla de realizar un modelo que sea fácilmente modificable para poder generar piezas de la misma familia pero de distintos tamaños cambiando únicamente los parámetros almacenados en una hoja de calculo externa.

Aunque existe la posibilidad de compartir parámetros entre los archivos generados por Autodesk Inventor al crear las piezas, en este trabajo se ha optado por almacenar los parámetros de importancia en una hoja de cálculo y vincularlo posteriormente con los modelos de inventor. Para poder realizar esto, la distribución de la hoja debe ser la siguiente:

Tabla 4. Distribución de la hoja de cálculo de parámetros.

Nombre del parámetro	Valor	Unidades	Comentario
----------------------	-------	----------	------------

La parametrización realizada para este prototipo de forma simplificada tiene dos propósitos principales destacables:

- Se han introducido todas las dimensiones del servomotor de forma que sea posible utilizar otro modelo de servo si se considerara necesario y únicamente deberían cambiarse los valores de estos parámetros. Puede observarse en rojo en la figura 4.13.
- Dado que dependiendo de la actividad para la que este destinado el robot podrían necesitarse distintas áreas de trabajo, se ha introducido como parámetros las longitudes de los componentes de la estructura mecánica, de forma que el prototipo pueda variar sus parámetros para variar su alcance. Puede observarse en azul en la figura 4.13.

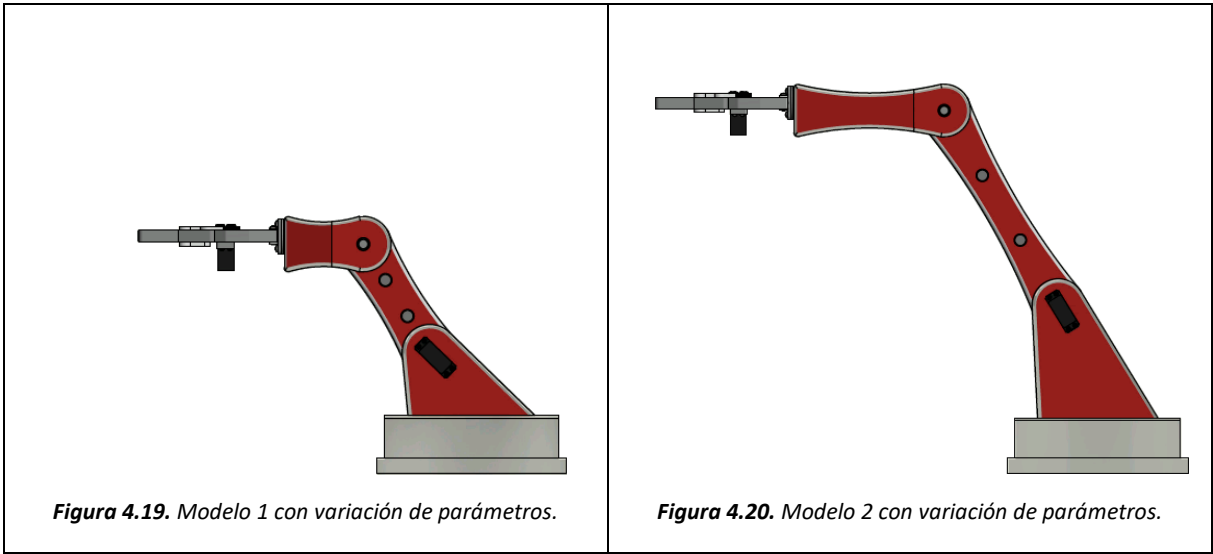
	A	B	C	D
1	anchoServo	20,5	mm	SERVO
2	largoServo	40,7	mm	SERVO
3	altoServo	39,5	mm	SERVO
4	largoalasServo	54,5	mm	SERVO
5	largoagujeroS	49	mm	SERVO
6	anchoagujeroS	10	mm	SERVO
7	longrotativo	40	mm	ROTATIVO ALARGADO
8	primeragujeroutil	13	mm	ROTATIVO ALARGADO
9	diametrorotcircular	25	mm	ROTATIVO ALARGADO
10	posicionagujeroscircular	20	mm	ROTATIVO ALARGADO
11	altura_base	50	mm	BASE
12	agujerointernobase	200	mm	BASE
13	alturahombro	100	mm	HOMBRO
14	diametrohombro	70	mm	HOMBRO
15	diametropasador	16	mm	HOMBRO
16	separacionunion	68	mm	HOMBRO
17	anchohombro	88	mm	HOMBRO
18	longitudbrazo	240	mm	BRAZO
19	longitudantebrazo	100	mm	ANTEBRAZO

Figura 4.18. Parámetros del prototipo virtual.

Para ilustrar los beneficios de realizar un modelo parametrizado, se van a mostrar dos versiones del prototipo virtual variando los parámetros que afectan al alcance del brazo robótico.

Tabla 5. Variación de los parámetros del prototipo virtual.

MODELO 1			MODELO 2		
Altura Hombro (mm)	Longitud Brazo (mm)	Longitud Antebrazo (mm)	Altura Hombro (mm)	Longitud Brazo (mm)	Longitud Antebrazo (mm)
80	160	60	150	300	160



Es sencillo apreciar la facilidad con la que se pueden variar las dimensiones del prototipo gracias al modelado paramétrico, de esta manera se pueden realizar rápidamente pruebas con brazos que disponen de distintas especificaciones. Es así como se pueden encontrar las dimensiones más adecuadas para la tarea para la que finalmente será asignado el robot o para generar una familia de brazos con distintas áreas de trabajo.

CAPÍTULO 5: MODELADO

5.1. BASE

Para modelar la base se ha realizado una revolución para obtener la forma cilíndrica exterior, incluyendo una zona inferior de mayor espesor para mejorar la resistencia y adherencia al puesto de trabajo. Posteriormente se ha introducido una unión transversal rectangular mediante una extrusión, de forma que quede fija a las paredes del cilindro, donde con una extrusión negativa se ha formado el espacio en el que irá alojado el servomotor de la base. Por último mediante la operación agujero, se han añadido 4 agujeros roscados que servirán para la fijación del servomotor a la base.

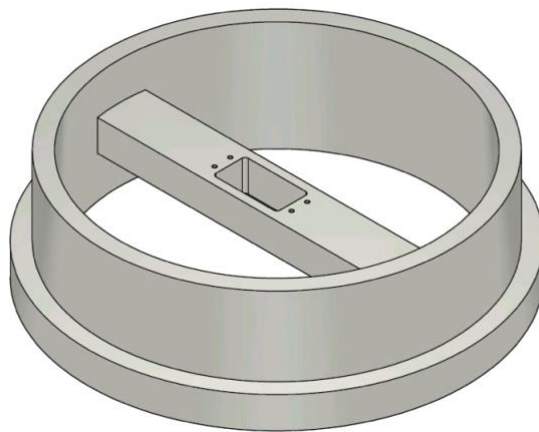


Figura 5.1. Modelado de la base.

El diseño concreto de esta pieza se ha realizado de forma que cuando el brazo esté completamente montado exista acceso al cableado interior de la base por la parte inferior. El espesor del elemento central es menor que el alto del servo, de forma que no exista obstrucción para la salida de cables del mismo.

5.2. HOMBRO

Debido a la rotación de la que dispone el hombro respecto del eje de la base, lo primero será crear la plataforma circular que permitirá este giro. Para ello se han realizado dos extrusiones; la primera del mismo diámetro que el superior externo de la base, de forma que quede apoyado sobre ésta. Para facilitar la operación y evitar deslizamientos, se ha generado una extrusión de poco espesor, de diámetro igual al interior de la base, para que esté en contacto con las paredes interiores del cilindro y evite posibles deslizamientos que pudieran perjudicar al eje del servomotor.



Figura 5.2. Modelado de la plataforma del hombro.

Cuando el brazo esté en funcionamiento, debido a su peso propio y al de la carga, generará un momento sobre el hombro que hará que la zona más solicitada sea la posterior. Es por esto que se ha optado por añadir una inclinación al hombro de forma que sea más resistente.

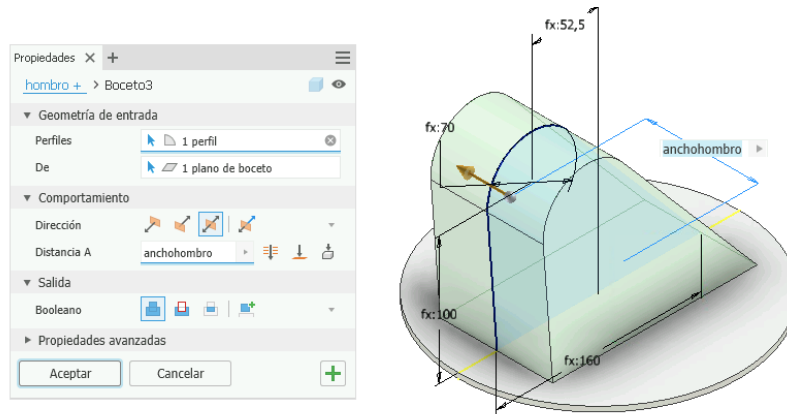


Figura 5.3. Modelado de la forma del hombro.

Para poder minimizar el material utilizado en la pieza se ha realizado una extrusión negativa con el perfil que aparece a continuación. La forma específica de este boceto se debe a que se ha buscado mantener material en la zona comentada anteriormente ya que como se ha explicado, será la más solicitada. Además se ha optado por mantener material alrededor de la zona donde irán alojados los brazos, de forma que se acompañe al movimiento y no recaiga el peso completamente sobre el eje del servomotor o el casquillo.

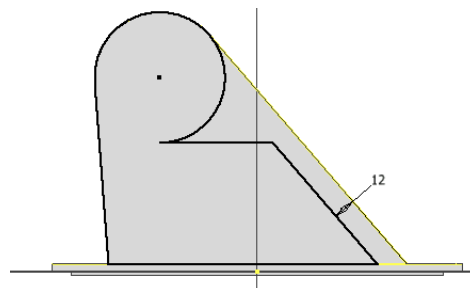


Figura 5.4. Perfil de vaciado de material del hombro.

Por último, se ha creado un espacio para el alojamiento del servo, un agujero para el casquillo y 4 agujeros en la plataforma que servirán para fijarla al servomotor situado en la base.

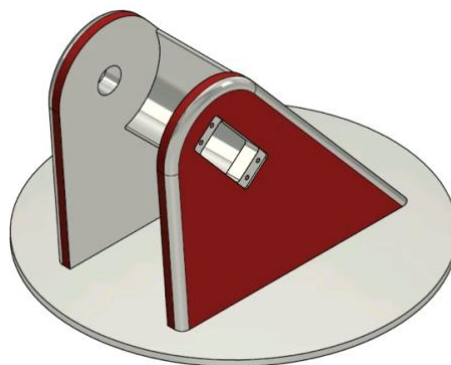


Figura 5.5. Modelado del hombro.

5.3. BRAZO

Para modelar el brazo lo primero ha sido generar el perfil que definirá la forma para posteriormente realizar una operación de extrusión para obtener la pieza. En concreto, ya que este brazo robótico ha sido diseñado para poder modificar sus dimensiones de forma que pueda utilizarse para distintas aplicaciones, se ha buscado que esta pieza fuera especialmente simple ya que es la que permitirá mayores variaciones de longitud.

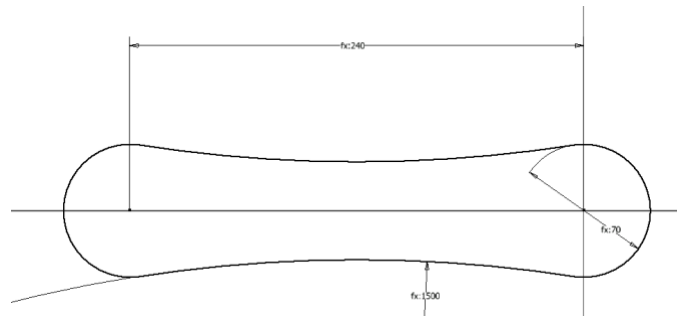


Figura 5.6. Boceto de la forma del brazo.

Después se han añadido varios agujeros: cuatro para la fijación con el eje del servo; uno que servirá como eje para alojar el casquillo que permitirá la articulación, y dos más donde irán situados unos pasadores que servirán para unificar esta pieza con otra idéntica, de forma que el conjunto del brazo estará constituido por dos piezas como ésta exactamente iguales.



Figura 5.7. Modelado del brazo.

5.4. ANTEBRAZO

A fin de obtener la forma principal de la pieza, lo primero es generar la parte que, unida al brazo generará la articulación antebrazo-brazo. Para ello ha de realizarse una extrusión que coincida con el diámetro del brazo y que tenga la misma anchura que se le había asignado a la pieza del hombro para que la unión sea correcta.

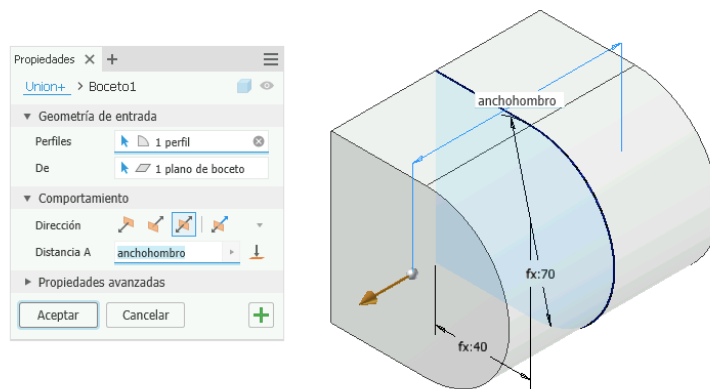


Figura 5.8. Generación de la primera parte del antebrazo.

Aunque este modelado se podría haber realizado generando una extrusión de un espesor determinado y realizando a continuación una simetría respecto a un plano indicando la distancia necesaria, debido a la parametrización, se ha optado por realizar la extrusión comentada anteriormente para poder así indicar la anchura del antebrazo y realizar posteriormente una extrusión negativa desde un plano medio para eliminar el material que no sea necesario, pues este prototipo se ha diseñado bajo el criterio de mínimo material posible.

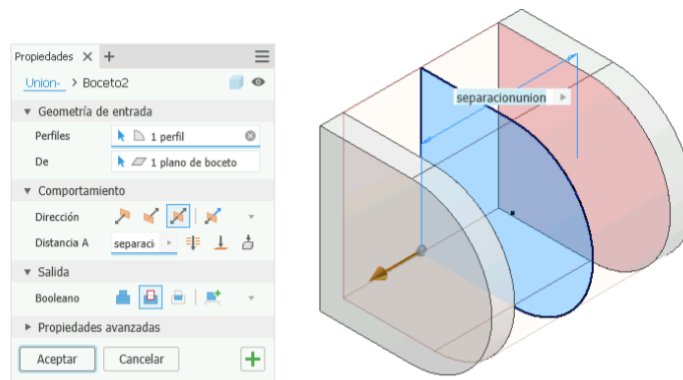


Figura 5.9. Eliminación de material en el antebrazo.

Una vez hecho esto, solo quedaría hacer una operación más de extrusión para obtener la forma principal del antebrazo. Para reducir el tamaño del antebrazo y que no sea tan ancho, se ha introducido un boceto con cierta inclinación para que el extremo sea más fino ya que solo se necesitará que disponga de anchura suficiente para alojar un servomotor.

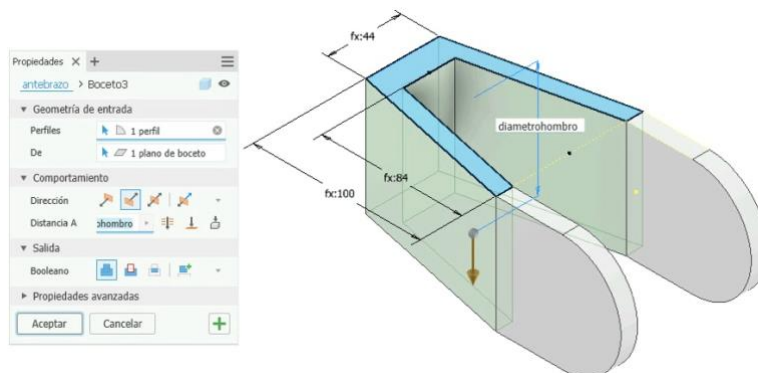


Figura 5.10. Extrusión del extremo del antebrazo.

Por último se le ha añadido curvatura a la geometría eliminado material con una extrusión y se han realizado las operaciones necesarias para añadir tanto los alojamientos de los dos servos como el agujero que servirá como eje para el casquillo.

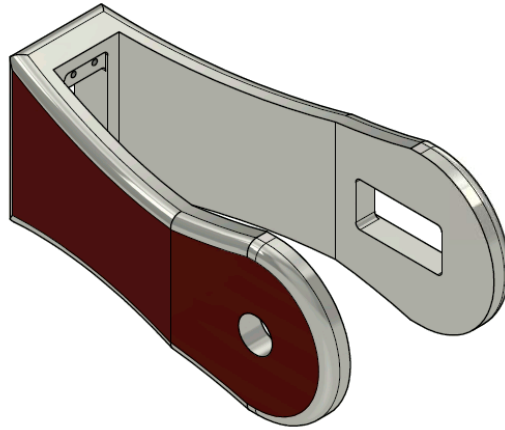


Figura 5.11. Modelado del antebrazo.

5.5. SUBCONJUNTO GRIPPER

5.5.1. CONECTOR

Como se verá posteriormente en el capítulo de Ensamblaje, ésta será la pieza clave para unir el subconjunto gripper al brazo robótico articulado. El diseño es sencillo, pues solo se busca que sea capaz de anclarse al servomotor situado en el extremo del antebrazo y servir como conector con los soportes encargados de fijarlo a la chapa del gripper. Para realizar el modelado se ha empezado con una primera operación de extrusión circular, ya que es la forma que más beneficia al alojamiento de la cabeza del servomotor, y otra extrusión de diámetro menor para eliminar cierto material de forma que el espesor de la cabeza del servomotor quede completamente cubierto por esta pieza. Posteriormente, solidario a la primera extrusión, se ha realizado otra rectangular y de forma análoga a como se hizo en la circular, también se ha quitado material para obtener una fijación extra de los soportes. Finalmente se han utilizado varias operaciones de agujero roscado que serán necesarios para fijar posteriormente este conector a los soportes y la cabeza del servomotor.



Figura 5.12. Modelado conector vista superior



Figura 5.13. Modelado conector vista inferior.

5.5.2. SOPORTE

El diseño de este soporte es muy simple ya que el objetivo es que encaje en el conector modelado anteriormente y sea capaz de asegurar la fijación de la chapa del gripper junto con otra pieza idéntica a ésta. Concretamente esta pieza se ha modelado realizando dos extrusiones rectangulares formando un ángulo de 90º una con otra, sin embargo también podría haberse realizado un perfil en L y extruirlo en caso de que se buscara minimizar las operaciones en el modelado. Una vez obtenida la geometría principal de la pieza, se han redondeado las aristas de forma que encaje dentro del conector y se han añadido los agujeros que posteriormente servirán para realizar los anclajes al conector y la chapa.

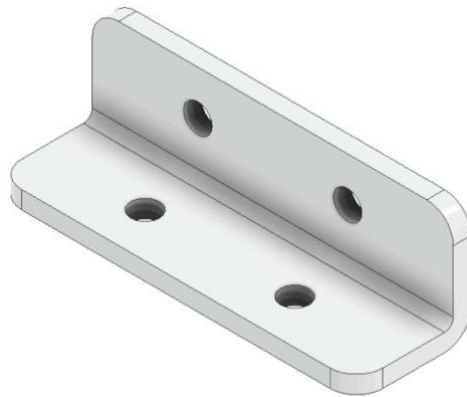


Figura 5.14. Modelado del soporte.

5.5.3. CHAPA

Esta pieza es el componente principal del gripper ya que servirá de base para el resto de componentes que se van a añadir para el correcto funcionamiento del subconjunto. Debido a que no es necesario que la geometría de la pieza sea maciza, no se ha añadido el material que no era necesario como soporte, por lo que se ha comenzado realizando una extrusión basada en el perfil que se muestra en la siguiente figura.

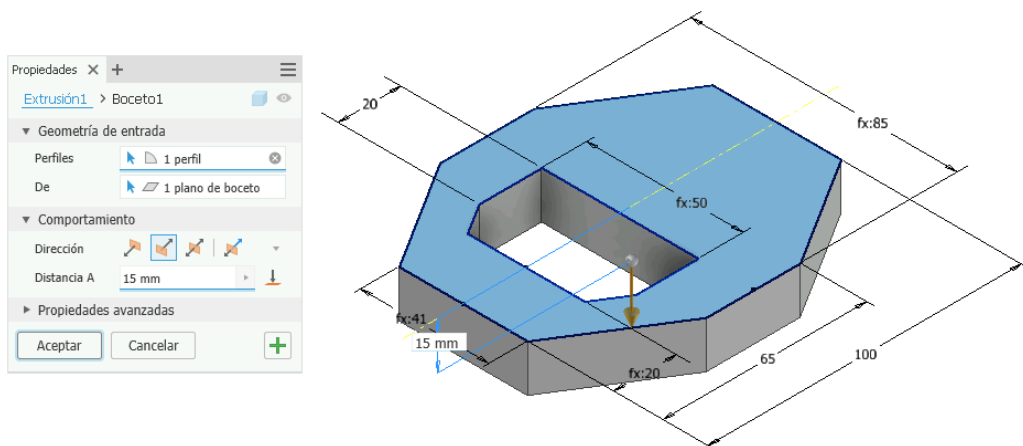


Figura 5.15. Extrusión forma básica de la chapa.

Para continuar se han realizado varias operaciones de agujero: dos para la fijación de la chapa a los soportes que irán unidos al antebrazo; otros dos que servirán como ejes para las barras de articulación que irán solidarios a las pinzas, y por último un agujero para el eje del engranaje izquierdo y otro que

sea capaz de alojar la cabeza del servo para fijarlo al engranaje derecho de forma que permita el correcto accionamiento del gripper.

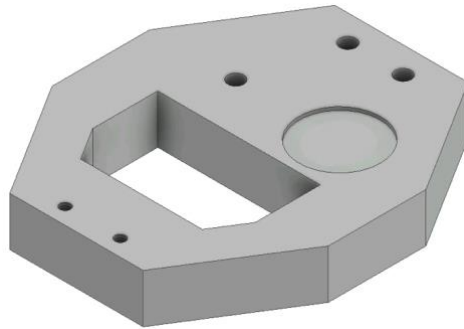


Figura 5.16. Localización de las operaciones de agujero en la chapa.

Para ultimar, hay que generar el espacio donde irá alojado el servo mediante varias operaciones de extrusión y finalizar el modelado redondeando las aristas.

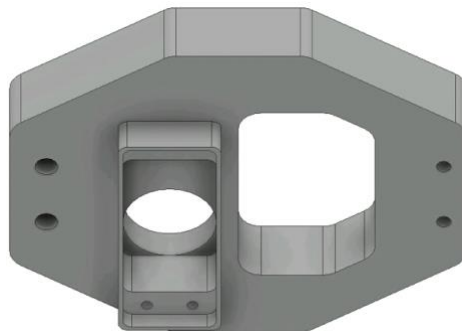


Figura 5.17. Modelado de la chapa del gripper.

5.5.3. BARRA DE ARTICULACIÓN

Esta pieza se utilizará varias veces en el ensamblaje y tendrá como función encargarse de la sujeción de la pinza y acompañar al movimiento de ésta. Para modelarlo, simplemente hay que realizar una operación de extrusión del perfil y hacer los agujeros que permitirán colocar posteriormente los ejes.



Figura 5.18. Modelado de la barra de articulación.

5.5.4. ENGRANAJES

Para el modelado de los engranajes, Autodesk Inventor ofrece la opción de diseñarlos a través de Design Accelerator mediante un generador de engranajes de dientes rectos.

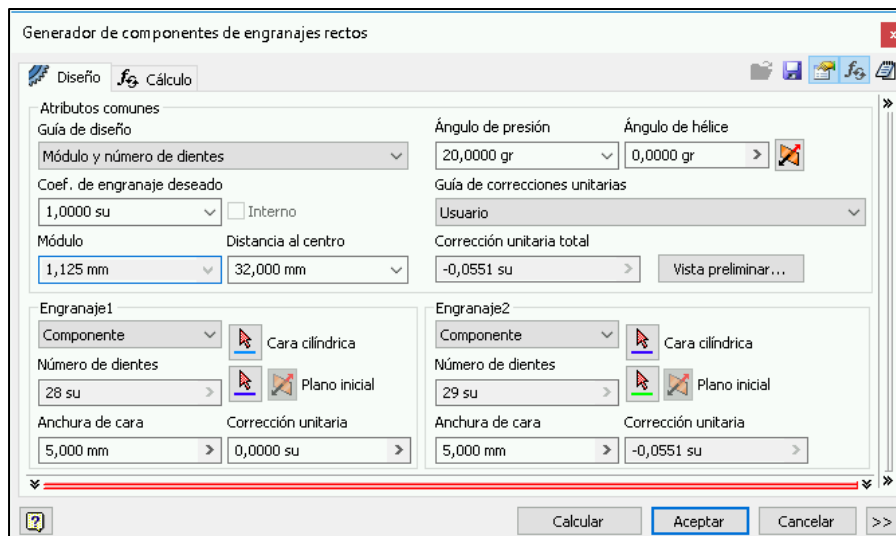


Figura 5.19. Ventana de Design Accelerator.

En este caso concretamente en la guía de diseño se ha seleccionado la opción de “Módulo y número de dientes” lo que proporciona la posibilidad de introducir el coeficiente de engranaje deseado, que como se busca que los engranajes sean iguales se ha introducido un valor de 1, y la distancia al centro, que eran los parámetros de más interés para este trabajo.

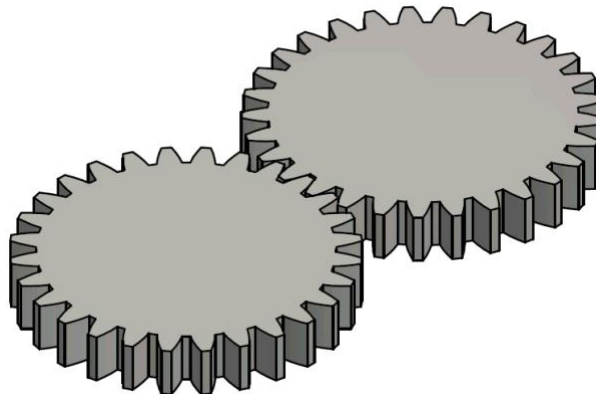


Figura 5.20. Engranajes generados mediante Design Accelerator.

Dado que se necesita modificar estos engranajes hay que editar el modelado de las piezas creadas por Inventor. Los cambios sufridos por las piezas son los mismos a excepción de una matriz circular de agujeros roscados en el engranaje que se fijará al servomotor del gripper.

Las operaciones comunes realizadas han sido una extrusión y una operación de agujero que servirá para alojar los ejes de las pinzas. Puede verse en la siguiente figura la forma del perfil de extrusión y la localización de los agujeros de los ejes, además de la matriz circular.

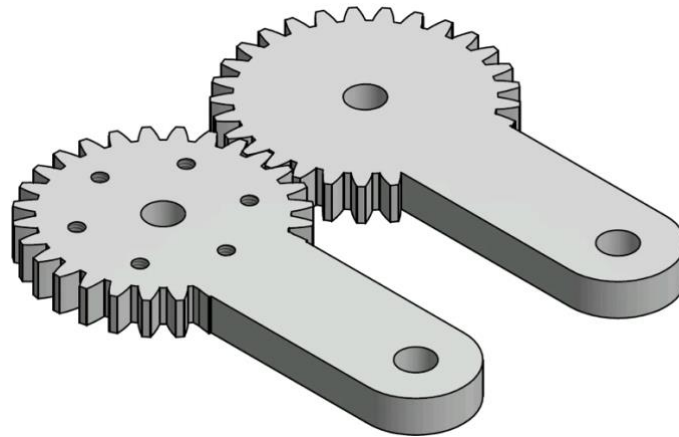


Figura 5.21. Modelado de los engranajes.

5.5.5. PINZA

Esta pieza será la encargada de la sujeción del objeto que necesite recogerse. Para su modelado se ha realizado una extrusión basada en el perfil que se muestra en la Figura 5.22. y a continuación se han realizado dos agujeros donde se situarán los ejes. Por último, al igual que en el resto de piezas, se han redondeado las aristas mediante la operación de empalme.

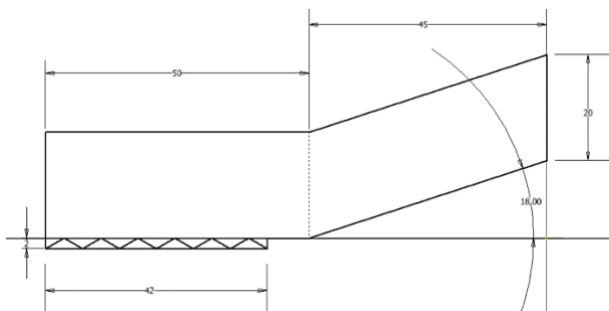


Figura 5.22. Boceto pinza.

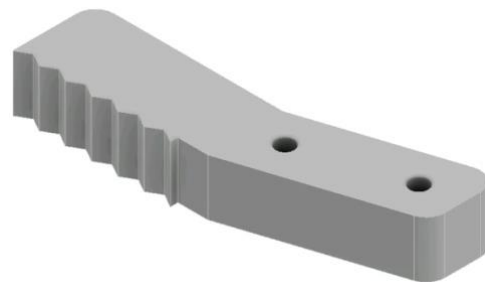


Figura 5.23. Modelado pinza.

5.5.6. PASADORES

Por último, se han modelado unos pasadores cilíndricos sencillos para el gripper de varias longitudes realizando una extrusión de un perfil circular de forma que permita unir unas piezas con otras permitiendo un giro relativo entre ellas.

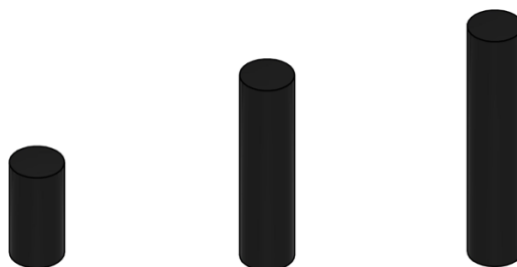


Figura 5.24. Modelado de los pasadores del gripper.

CAPÍTULO 6: ENSAMBLAJE

6.1. RESTRICCIONES

Al insertar una pieza en el modo de ensamblaje de Autodesk Inventor, ésta dispondrá de 3 desplazamientos y 3 giros. Para poder definir los movimientos que tendrá cada pieza, pueden añadirse restricciones, las cuales reducirán los grados de libertad correspondientes al tipo de restricción. Si se opta por fijar una pieza al origen o en cualquier punto del espacio, todos su grados de libertad quedan bloqueados [1].

Aunque existen varios tipos de restricciones, en el ensamblaje se han utilizado únicamente las siguientes:

- Restricción de coincidencia de plano con plano: sirve para crear una coincidencia entre planos de forma que queden enfrentados o adyacentes. Bloquea 3 grados de libertad, dejando únicamente disponibles los desplazamientos en paralelo al plano y la rotación en el eje perpendicular.
- Restricción de coincidencia de ejes: sirve para especificar que dos piezas o agujeros sean concéntricos. Bloquea 4 grados de libertad, dejando únicamente disponibles el desplazamiento en la dirección del eje y la rotación sobre él mismo.

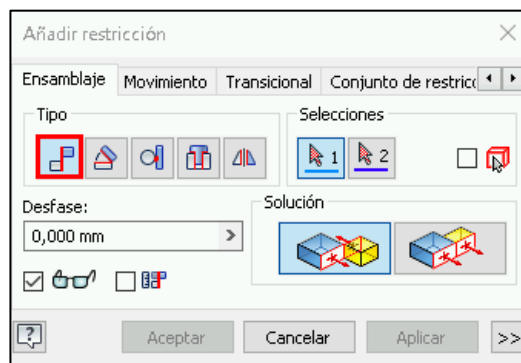


Figura 6.1. Menú de restricciones.

6.2. CENTRO DE CONTENIDO

El centro de contenido de Autodesk Inventor dispone de bibliotecas con numerosas piezas normalizadas que pueden utilizarse en los ensamblajes. Utilizar piezas de estas bibliotecas disminuye en gran medida el tiempo dedicado al modelado.

Las piezas obtenidas del centro de contenido pueden ser modificadas mediante operaciones de modelado, o incluso cambiar sus propiedades, como el material del que están compuestas.

Se muestra a continuación un listado de las piezas obtenidas de las bibliotecas de Autodesk Inventor:

- ISO 7045 – Varios tamaños - H : Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - producto de clase A
- ISO 2795 - 12 x 16 x 20 : Casquillo

- ISO 2338 - 16 h8 x 65 : Pasador cilíndrico

Las propiedades del casquillo y el pasador cilíndrico se han modificado para especificar que el material del que están compuestos es plástico ABS.

6.3. ENSAMBLAJE DEL BRAZO ROBÓTICO

Para iniciar el ensamblaje, se empieza colocando la pieza base en el origen y seguidamente se fijará el servomotor en el alojamiento que le corresponde.

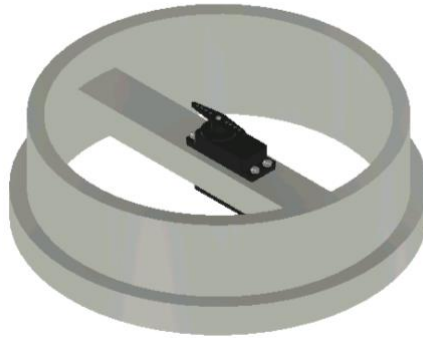


Figura 6.2. Primera parte del ensamblaje del brazo robótico.

Para que el hombro realice correctamente su función, deberá estar restringido respecto de la base, pero además ya que el giro vendrá accionado por el servomotor, los agujeros de la base tendrán que coincidir con los de la cabeza del servomotor, de esta forma el hombro dispondrá de su grado de libertad de giro.

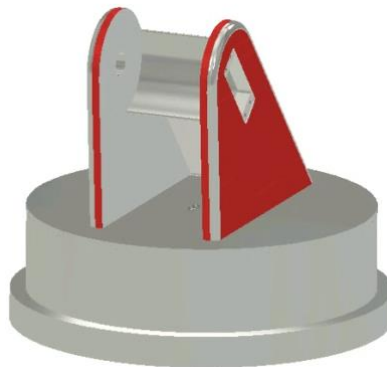


Figura 6.3. Segunda parte del ensamblaje del brazo robótico.

La articulación del hombro con el antebrazo se hace mediante un servomotor y un casquillo, por lo que primero habrá que restringir ambos para que se sitúen en su lugar. Una vez realizado esto, hay que añadir las dos piezas que conjuntamente funcionarán como el brazo. Ambas deberán ser concéntricas al eje de articulación del hombro. Una de ellas, la que llevará colocado el casquillo, deberá estar en contacto con la superficie del hombro, y la otra se restringirá al servomotor para que el movimiento sea accionado por él. Por último, de forma que las dos piezas que forman el brazo se muevan en sincronía, se unirán mediante dos pasadores.



Figura 6.4. Tercera parte del ensamblaje del brazo robótico.

Como ya sucedía en la articulación del hombro, en el antebrazo también se realizará mediante un servomotor que irá alojado en el antebrazo, y un casquillo, por lo que una vez que ambas piezas queden restringidas al antebrazo, se realizarán las restricciones correspondientes respecto del brazo para que quede libre el grado de libertad que se busca. Para finalizar la parte del ensamblaje de la estructura mecánica solo quedaría añadir el último servomotor que se sitúa en el extremo del antebrazo.



Figura 6.4. Cuarta parte del ensamblaje del brazo robótico.

El ensamblaje del subconjunto gripper comenzará situando fijo al origen el conector, de forma que posteriormente puedan fijarse a éste los dos soportes que sujetan la placa.

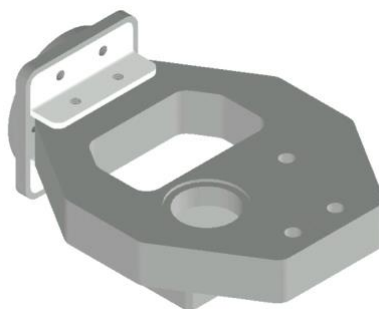


Figura 6.5. Primera parte del ensamblaje del gripper.

Los engranajes se insertan como un subconjunto que genera inventar en el que ya están realizadas de forma automática las restricciones necesarias para que engranen correctamente. Una vez quedan colocados concéntricamente con sus respectivos agujeros, lo siguiente es colocar las barras de articulación junto con los ejes para finalmente añadir las pinzas de forma que quede completo el ensamblaje del subconjunto.

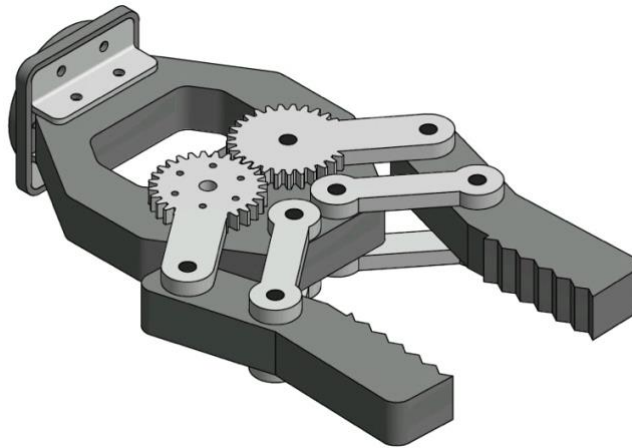


Figura 6.6. Ensamblaje gripper.

Para terminar el ensamblaje global, solo habría que terminar de restringir el gripper al servomotor del antebrazo y añadir el servomotor que acciona las pinzas, de forma que el brazo robótico articulado estuviera completo.

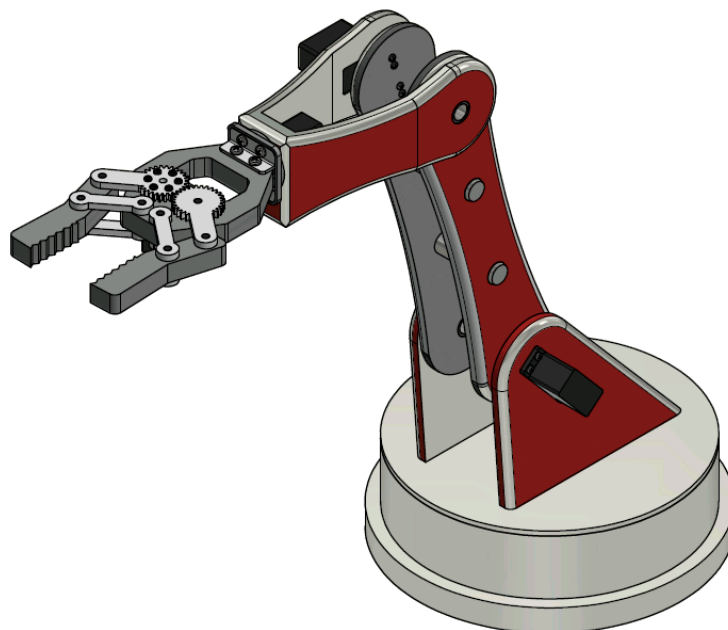


Figura 6.7. Ensamblaje brazo robótico articulado.

CAPÍTULO 7: SIMULACIÓN DINÁMICA

Para reducir la creación de prototipos físicos para la comprobación del correcto funcionamiento del diseño, existe la alternativa de la simulación dinámica que permite una vez realizado un ensamblaje simplificado, convertir las restricciones del ensamblaje en uniones mecánicas de forma automática. Con esta simulación se pueden aplicar fuerzas externas, incluida la gravedad, y añadir inercia, amortiguamiento y rozamientos para aproximar la simulación lo máximo posible a la realidad. Con toda esta información es posible conocer los posibles fallos que tenga el diseño o incluso reducir el material utilizado para conseguir el mejor producto posible [13].

7.1. UNIONES

Como ya se introdujo anteriormente en el capítulo del Brazo Robótico, en el apartado de estructura mecánica, las uniones son la forma que tiene Autodesk Inventor de interpretar las articulaciones del conjunto. La gran diferencia entre las uniones mecánicas de la simulación dinámica y las restricciones del ensamblaje es que, el vínculo que existe entre los elementos va más allá de la definición de los grados de libertad. Incluye información como el coeficiente de fricción entre elementos en contacto, el amortiguamiento entre piezas o el movimiento relativo entre ambas.

Aunque inventor ofrece un amplio catálogo de uniones, para este prototipo solo se ha utilizado un tipo de unión:

- Revolución: es una unión sin traslación que permite una rotación sobre el eje z. Inventor la crea automáticamente desde la restricción de ensamblaje de insertar o de coincidencia de ejes.

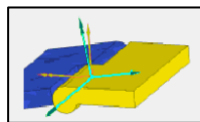


Figura 7.1. Unión de revolución.

Concretamente en esta simulación, ya que el objetivo va a ser encontrar el par necesario en las articulaciones hombro-brazo y brazo-antebrazo, será más que suficiente utilizar 4 uniones mecánicas para realizarla.



Figura 7.2. Información sobre la simulación dinámica.

- Revolución 1: Giro rotativo de la base.
- Revolución 2: Giro relativo del brazo respecto del hombro.
- Revolución 3: Giro relativo del antebrazo respecto del brazo.
- Revolución 4: Giro rotativo del gripper.

Cuando se realice la simulación para averiguar el par necesario en las articulaciones que se van a estudiar, será necesario bloquear el resto de grados de libertad de las uniones restantes.

7.2. COEFICIENTE DE FRICCIÓN

La fricción entre piezas es un parámetro importante a tener en cuenta, ya que con el uso se puede terminar comprometiendo el correcto funcionamiento del prototipo original debido a que surja holgura entre piezas o se pierda la precisión de operación de la que disponía originalmente.

Para poder definir esta fricción entre componentes, Inventor permite indicar cuál es el coeficiente de fricción seca en la unión seleccionada. Para el caso del plástico ABS, se trata de un valor de 0,5 ^[12] y se deberá especificar que la fricción se realiza con un radio igual al del eje donde sucede el movimiento entre las piezas.

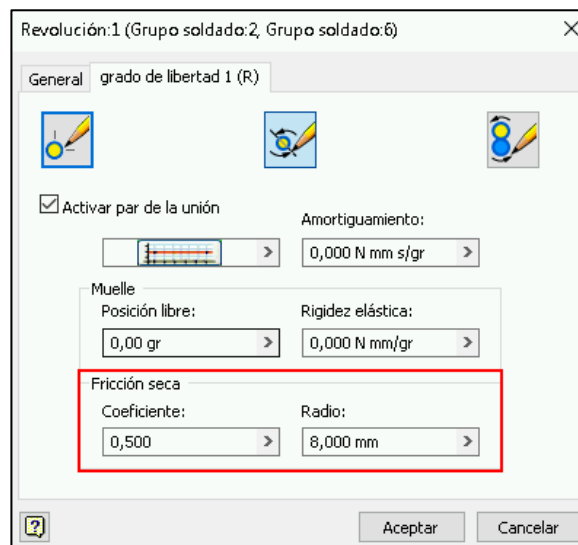


Figura 7.3. Menú de propiedades de la unión.

7.4. PAR NECESARIO DE LA ARTICULACIÓN HOMBRO-BRAZO

La simulación que va a realizarse para asegurar el correcto funcionamiento de la articulación inferior del brazo robótico, va a ser levantar una carga nominal de 125 gramos desde el punto inferior situado a -100 hasta la altura máxima que se sitúa a 0°. Para realizar esta operación, el brazo se va a mantener extendido en todo momento ya que es en este caso cuando se genera el máximo par posible. Se puede asumir que la situación más desfavorable se dará cuando el brazo se encuentre completamente horizontal.

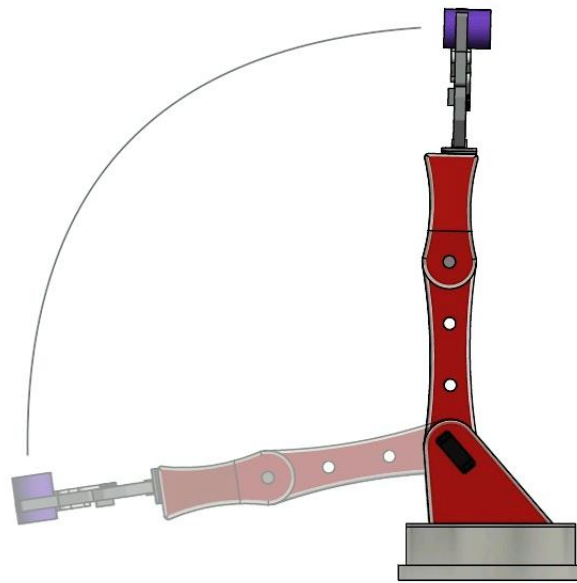


Figura 7.4. Movimiento para hallar el par necesario de la articulación inferior.

Para poder conocer el par que debe tener la articulación para realizar el movimiento, Inventor ofrece una herramienta llamada “Fuerza Desconocida” en la que únicamente hay que indicarle cuál es la posición inicial y final del brazo y la dirección del par de torsión.

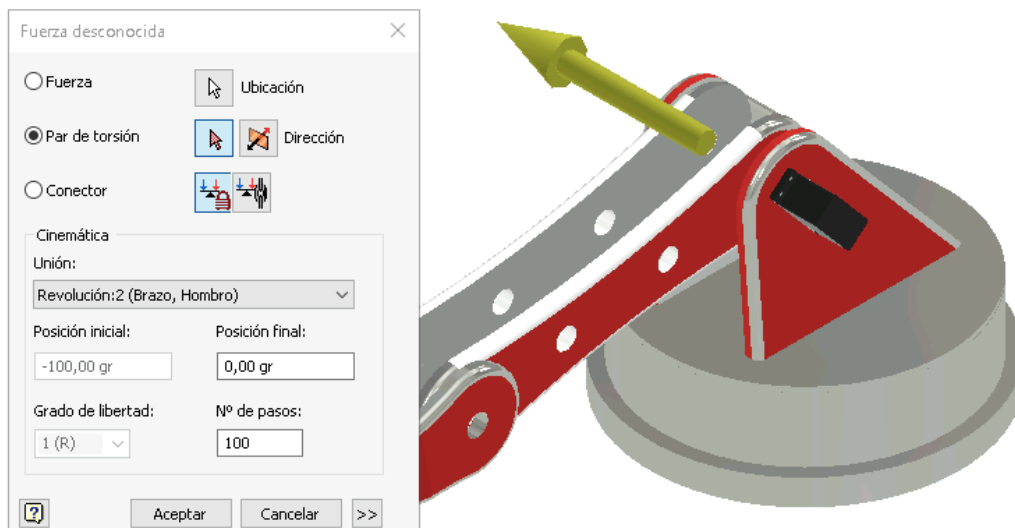


Figura 7.5. Menú Fuerza desconocida.

Una vez realizada la simulación dinámica, Inventor proporciona un gráfico de salida de datos que puede exportarse a una hoja de cálculo.

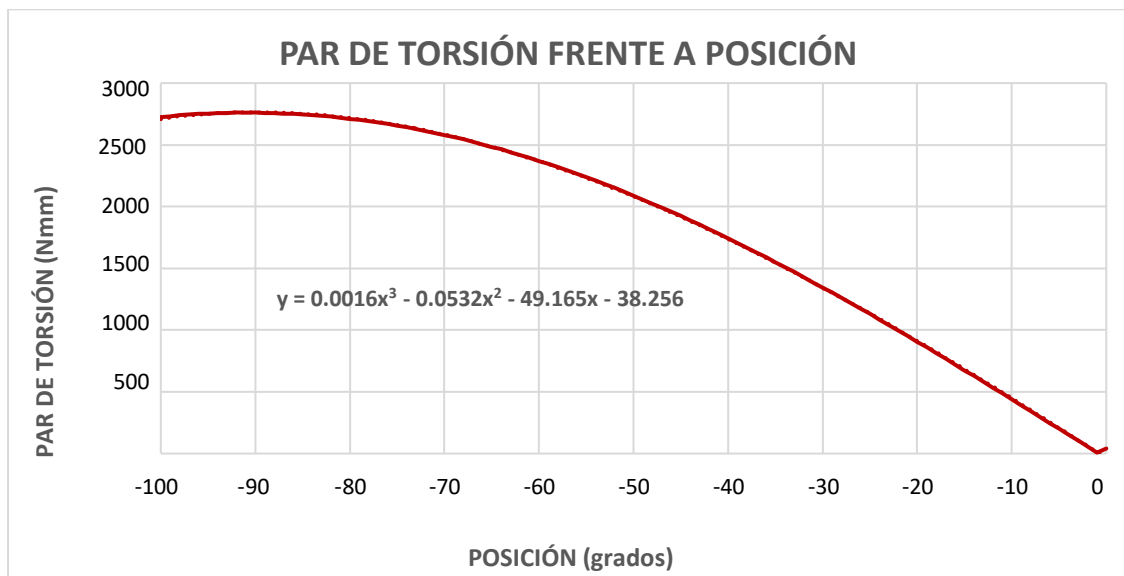


Figura 7.6. Gráfico par de torsión frente a posición de la articulación hombro-brazo.

Analizando los datos proporcionados tras la simulación, se observa lo que se sospechaba anteriormente, el par máximo se da para un ángulo de -91° y tiene un valor de 2760Nmm. Una vez conocido este par necesario, se va a aplicar un par de torsión de un valor constante ligeramente superior para añadir un margen de seguridad para garantizar el funcionamiento.

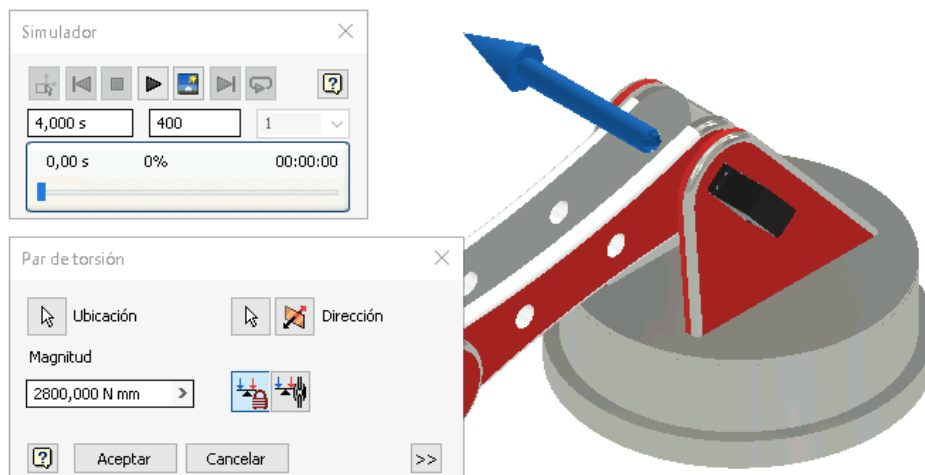


Figura 7.7. Simulación dinámica con un par de torsión constante conocido.

Se observa que la simulación es correcta, ya que el brazo puede elevar la carga venciendo el par máximo, por lo que se puede concluir que con un par en la articulación hombro-brazo de 2800Nmm será suficiente para afrontar la situación más desfavorable posible con una carga de 125 gramos.

Dado que el modelo utilizado para la simulación dinámica se trata de una versión simplificada, hay que tener en cuenta que el peso del brazo aumentará cuando contenga todos sus componentes, así que para la elección del servomotor más adecuado hay que elegir uno que proporcione un amplio margen para así asegurar que el funcionamiento será correcto.

Para la selección de servomotores ha de conocerse el par de torsión en $\text{kgf}\cdot\text{cm}$, de forma que lo primero será realizar la conversión.

$$\text{Par máximo} = 2800\text{Nmm} = 28,55\text{kgf} \cdot \text{cm}$$

Conociendo esta información, para la articulación inferior del brazo robótico articulado se ha escogido el servomotor CYS S0650, pues éste ofrece un par de torsión de $45\text{kgf}\cdot\text{cm}$ cuando se le suministra 6V, y $55\text{kgf}\cdot\text{cm}$ cuando son 7V. Se elige este servo puesto que utilizar un modelo de $30\text{kgf}\cdot\text{cm}$ sería demasiado ajustado y de esta forma se obtiene un amplio rango en el que se asegura el correcto funcionamiento del brazo y además otorga la posibilidad de ampliar la carga que es capaz de levantar el brazo robótico.

Puede observarse que cuando se ha realizado la simulación dinámica, se ha introducido un par constante, aunque se sabe que no será necesario aplicar el par máximo en todo momento, ya que la fuerza necesaria para levantar la carga varía respecto del ángulo donde se encuentre. Para optimizar la fuerza aplicada de forma que el brazo aplique únicamente el par necesario para levantar la carga, puede realizarse una simulación introduciendo la ecuación obtenida mediante la línea de tendencia que se ha aproximado en la Figura 7.7 como par de torsión. De esta forma se obtiene una simulación más aproximada al funcionamiento real.

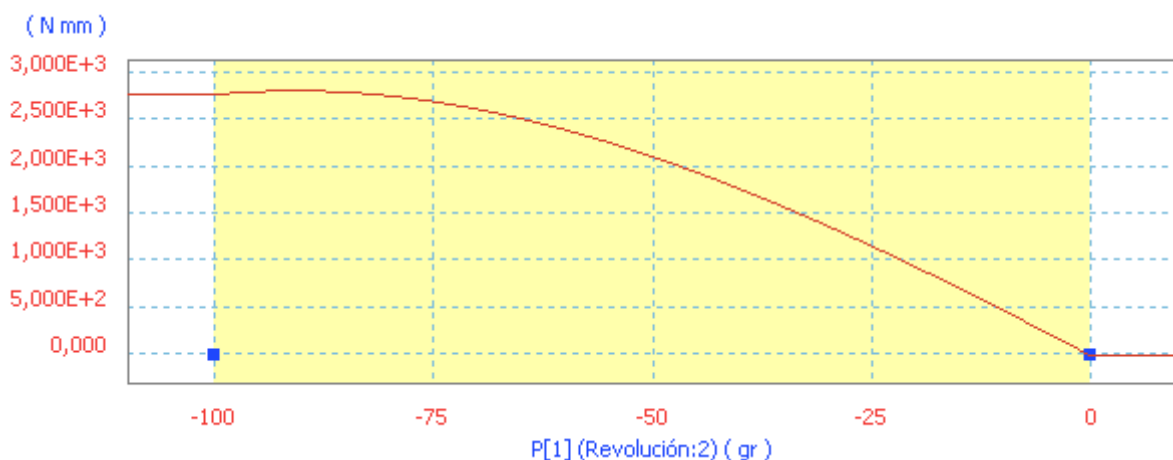


Figura 7.8. Par de torsión variable con el ángulo.

La ventaja de esta simulación es que se aprecia un movimiento más uniforme que se realiza a una velocidad constante evitando posibles velocidades excesivas donde el par necesario sea mucho menor que el par máximo.

7.4. PAR NECESARIO DE LA ARTICULACIÓN BRAZO-ANTEBRAZO

En este caso el movimiento a analizar va a ser similar al que se hizo para la articulación inferior, pero esta vez la parte móvil estará compuesta únicamente por el antebrazo, gripper y carga. Concretamente

en esta simulación el punto inferior estará a 40º y el superior a 180º y la carga será la nominal de 125 gramos.

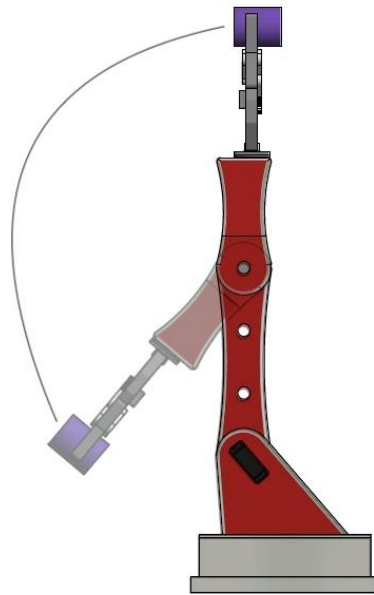


Figura 7.9. Movimiento para hallar el par necesario de la articulación superior.

Como ya se hizo anteriormente, para conocer cuál será el par necesario en esta articulación se utilizará la herramienta “Fuerza desconocida”, la cual devuelve el siguiente gráfico de datos:

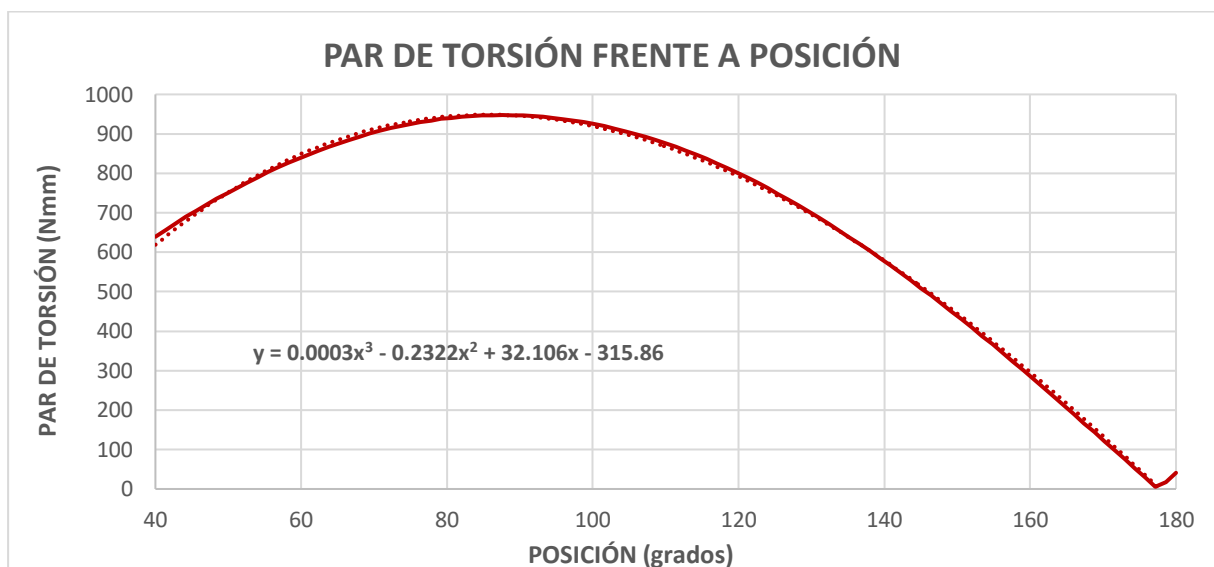


Figura 7.10. Gráfico par de torsión frente a posición de la articulación brazo-antebrazo.

El par máximo se da para un ángulo de 88º y tiene un valor de 948Nmm. Para hacer la comprobación, se aplica un par de 950Nmm a la articulación y se observa que la simulación se realiza con éxito.

$$\text{Par máximo} = 950\text{Nmm} = 9,7\text{kgf} * \text{cm}$$

Para esta articulación, se ha elegido un servomotor DS3225 que proporciona un par de 21kgf*cm cuando está alimentado a 5V, y 25kgf*cm a 6,8V. Al igual que con la articulación inferior se ha seleccionado un servo con cierta holgura, ya que el ensamblaje de la simulación es un prototipo simplificado.

7.4. CARGA MÁXIMA

Una vez conocido el par máximo que serán capaces de generar los servomotores propuestos, se va a realizar un estudio para aproximar la carga máxima que será capaz de levantar el brazo robótico.

Lo primero es establecer un límite superior para cada articulación que permita un margen adecuado teniendo en cuenta la simplificación del prototipo. Para situarse en el lado de la seguridad, va a proponerse que no se supere el 70% de la capacidad del servomotor, ya que un 30% de margen es suficientemente elevado para garantizar que en el prototipo completo no existan excesos de peso en caso de usar la máxima carga.

$$\text{Límite superior articulación brazo – antebrazo} = 0,7 * 25 = 17,5\text{kgf} * \text{cm} = 1715\text{Nmm}$$

$$\text{Límite superior articulación hombro – brazo} = 0,7 * 55 = 38,5\text{kgf} * \text{cm} = 3775\text{Nmm}$$

Tras un proceso iterativo, se halla primero el límite superior de la articulación hombro-brazo, ya que para una carga de 315 gramos se necesita un par máximo de 3773Nmm. En la articulación superior, el par máximo que se necesita es de 1510Nmm, que se sitúa considerablemente por debajo del límite superior establecido.

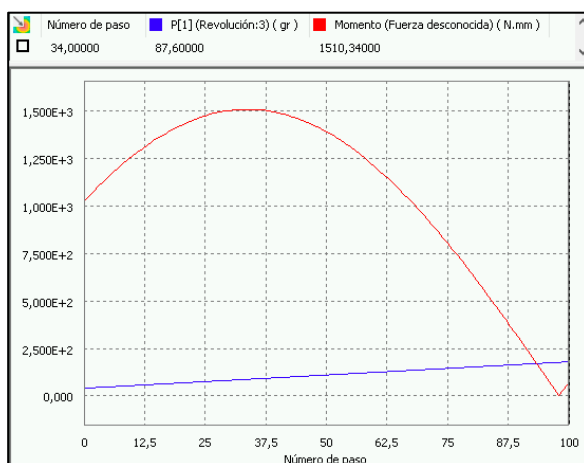


Figura 7.11. Salida de datos Fuerza desconocida de la articulación brazo-antebrazo para máxima carga.

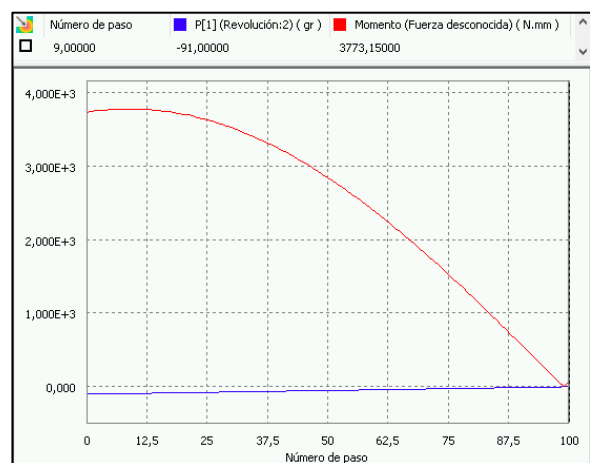


Figura 7.12. Salida de datos Fuerza desconocida de la articulación hombro-brazo para máxima carga.

En conclusión, la carga máxima que puede soportar el brazo robótico articulado asegurando un correcto funcionamiento en las situaciones más desfavorables es de 315 gramos.

7.4. SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO COMPUESTO

Para obtener una simulación más aproximada a un movimiento completo común del brazo robótico, se va a hacer que eleve la carga máxima de 315 gramos y la desplace a otra posición situada a 90° de su punto de origen. Para ello el brazo se elevará 70° a la vez que el antebrazo descenderá 70° para que el objeto que se esta transportando se halle siempre en su posición original. Una vez realizado esto, el hombro realizará un giro de 90° respecto de la base y se parará. Finalmente, el brazo descenderá 70° mientras que el antebrazo ascenderá 70° para situar el objeto a la misma altura que se recogió pero desplazado 90° de su punto inicial.

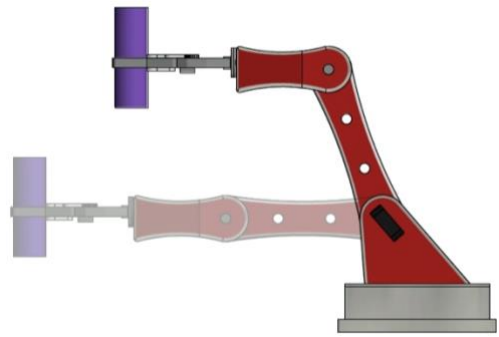


Figura 7.13. Elevación de la carga.

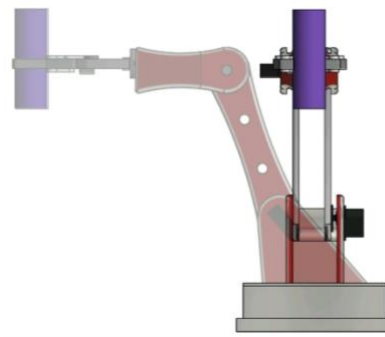


Figura 7.14. Giro relativo del hombro respecto de la base .



Figura 7.15. Descenso de la carga.

En el grafico de salida que devuelve Autodesk Inventor se muestra la posición angular de cada articulación en función del tiempo.

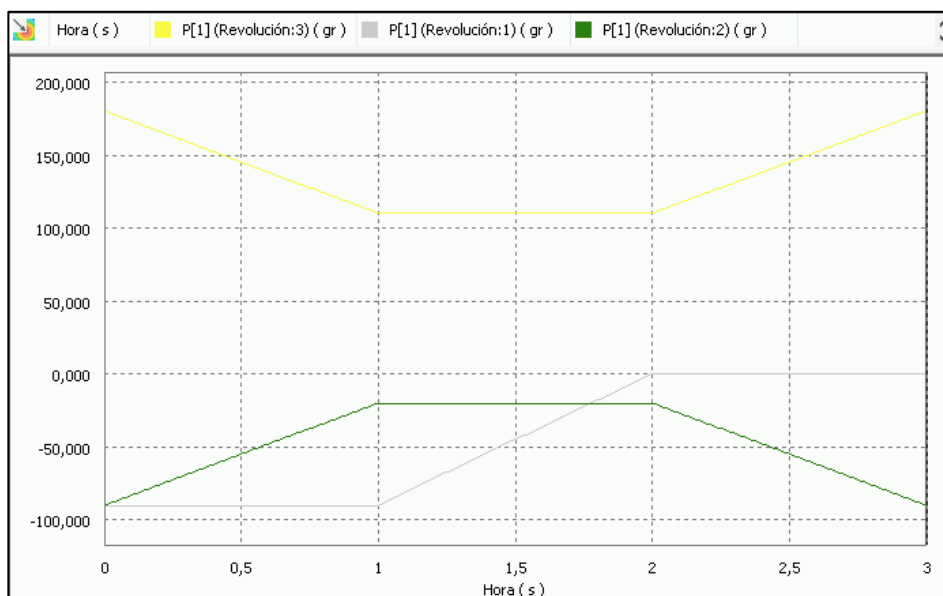


Figura 7.16. Gráfico de posición en función del tiempo de simulación de cada articulación.

Finalmente, para afirmar el correcto funcionamiento de la simulación se comprueba que en efecto, los momentos generados en las articulaciones estudiadas anteriormente no han superado el límite establecido por los servomotores propuestos.

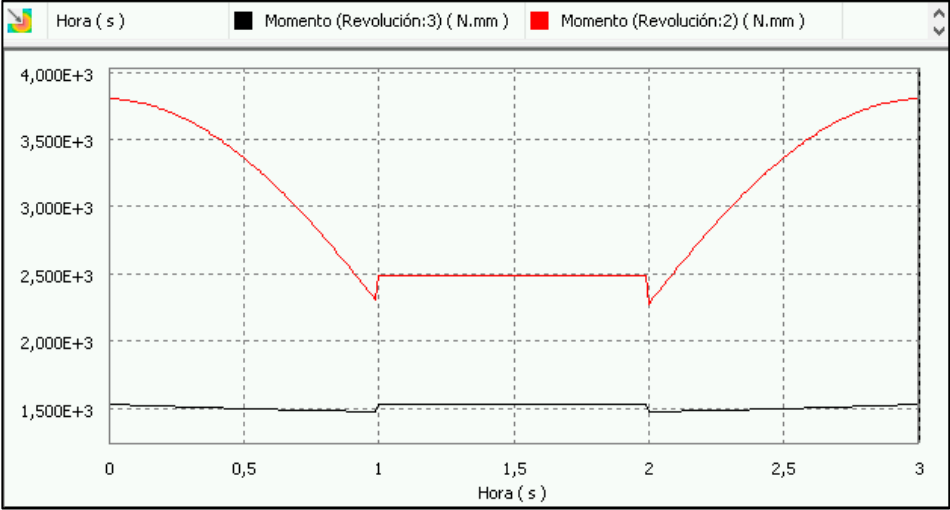


Figura 7.17. Gráfico de momento en función del tiempo de simulación de cada articulación.

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE TENSIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar el análisis de tensión del brazo robótico, se va a suponer la situación más desfavorable, que se corresponde con la que se estudió en el capítulo de Simulación Dinámica cuando se halló el par necesario para la articulación hombro-brazo, pero en este caso será con la máxima carga para asegurar el correcto funcionamiento del brazo en todo su rango de carga.

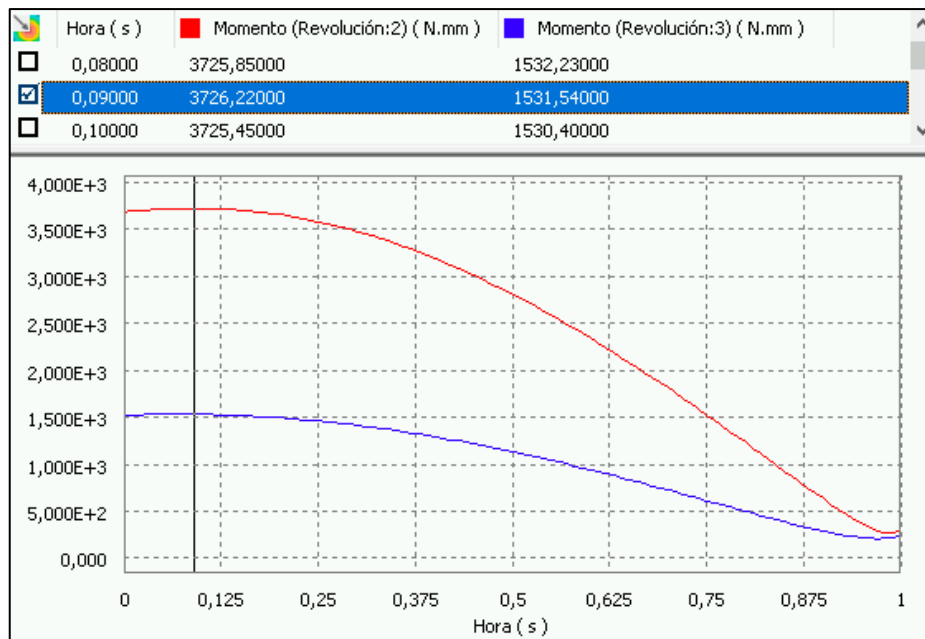


Figura 8.1. Gráfica de salida de la simulación dinámica de la situación más desfavorable.

Se ha escogido para realizar el estudio el punto de máximo momento en la articulación hombro-brazo, en el que al mismo tiempo se tiene prácticamente también el punto de máximo momento en la articulación brazo-antebrazo, es por esto que se asegura que es el instante más solicitado.

Para realizar el estudio, hay que seleccionar la pieza en la que se va a aplicar el método de los elementos finitos. En este caso, el análisis se va a realizar sobre el brazo, sin embargo, al exportarlo para realizar el análisis de tensión, debido a la interpretación que realiza Autodesk Inventor de las uniones, se podía apreciar que el resultado no era correcto. Para solucionar este problema, se ha modelado una pieza con las mismas características de las que disponía el subconjunto que funciona como brazo, es decir, los dos brazos con los pasadores, de esta manera se eliminan las uniones innecesarias que provocan que la simulación no se realice correctamente y además como ventaja se analiza el subconjunto completo.

Como se explicó anteriormente en el capítulo de Materiales y Métodos, en el apartado de Elementos Finitos; depende del tamaño del mallado la aproximación que se tendrá a la solución real. Es por esto que después de realizar varias pruebas se ha optado por modificar los parámetros por defecto de los que dispone Autodesk Inventor y se ha seleccionado que el tamaño medio de elemento sea de 0,5 y el

ángulo máximo de giro de 30gr para obtener una buena aproximación a la solución, ya que reduciendo más el mallado se observa que la diferencia de aproximación a la solución es despreciable.

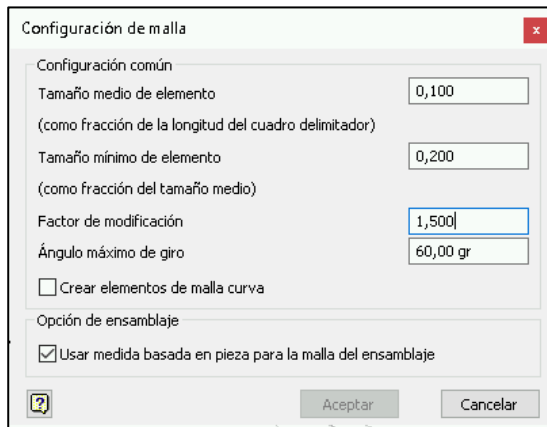


Figura 8.2. Menú de Configuración de malla por defecto.

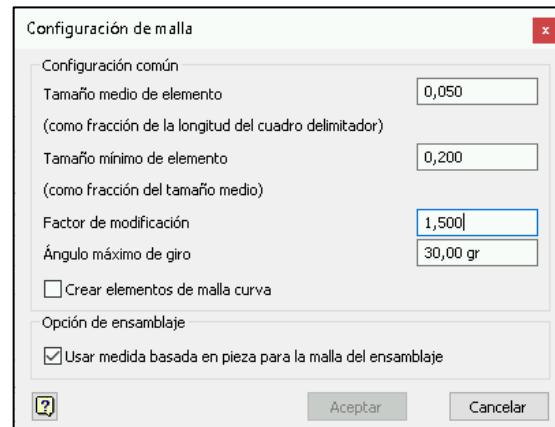


Figura 8.3. Menú de Configuración de malla modificado.

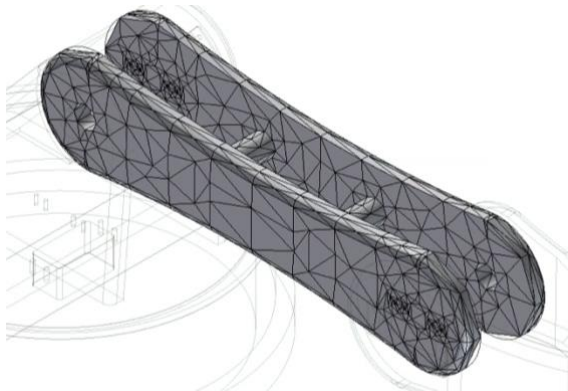


Figura 8.4. Mallado por defecto.

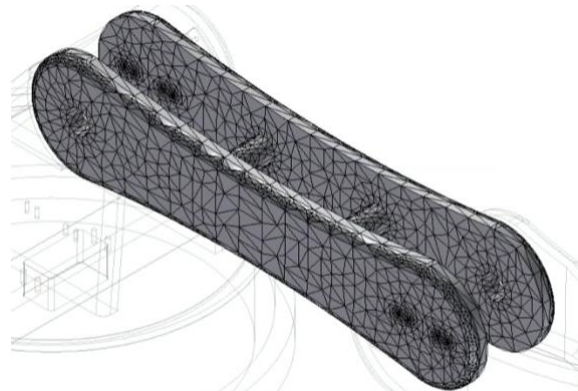


Figura 8.5. Mallado modificado.

Para la configuración de convergencia, se va a establecer que realice un máximo de 15 refinados para obtener la solución y no se va a introducir un criterio de parada, de esta forma puede apreciarse como se estabiliza el trazado de convergencia.

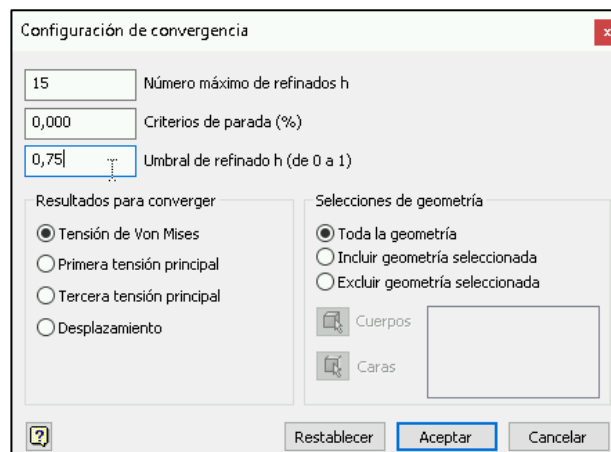


Figura 8.6. Configuración de convergencia para un máximo de 15 refinados sin criterio de parada.

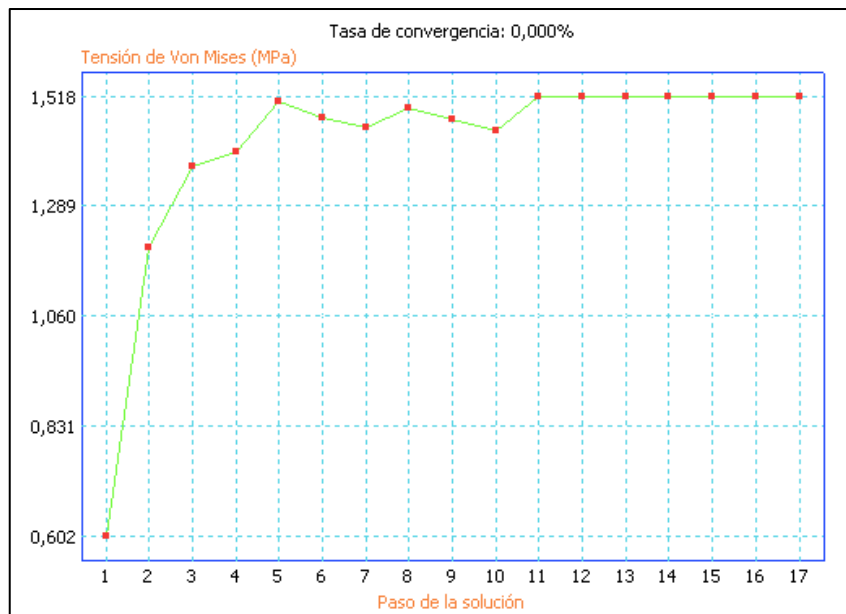


Figura 8.7. Trazado de convergencia para un máximo de 15 refinados sin criterio de parada.

Como puede observarse, a partir de la iteración nº 11, la convergencia a la solución se estabiliza proporcionando un error nulo. Para realizar el estudio en un periodo de tiempo más reducido, es fácil ver que estableciendo un número máximo de refinados de 10, e introduciendo un criterio de parada del 1%, se obtendrá una solución igual de aproximada pero reduciendo considerablemente el número de iteraciones a realizar por el programa.

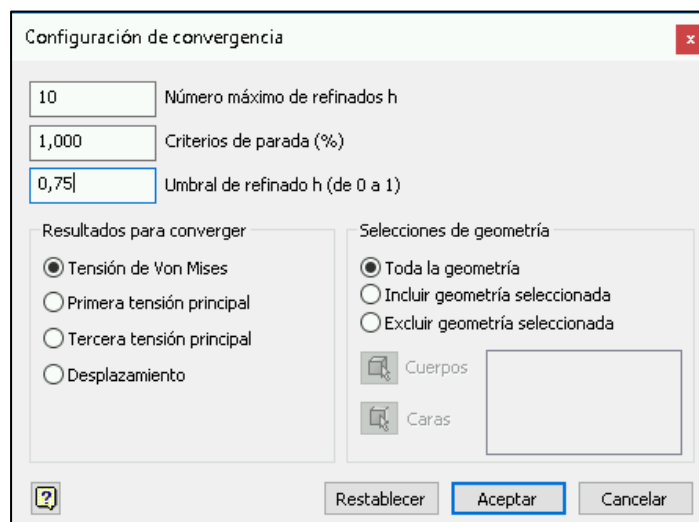


Figura 8.8. Menú de Configuración de convergencia.

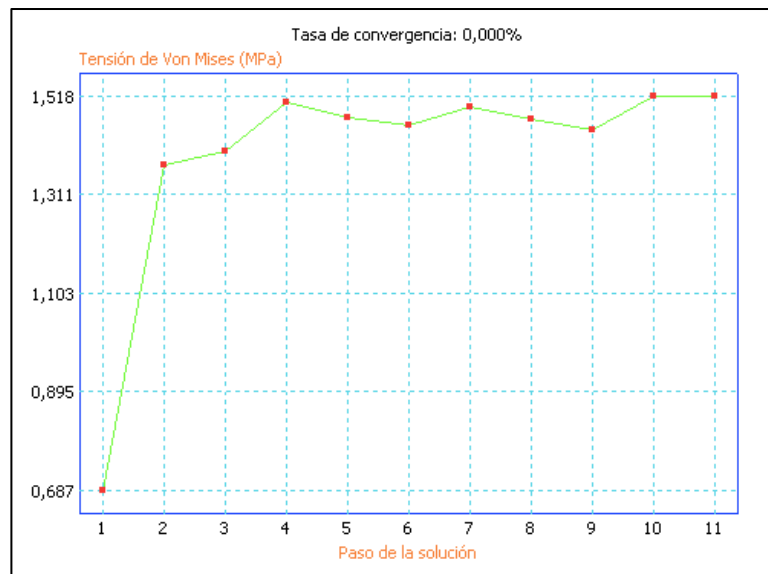


Figura 8.9. Trazado de convergencia para un máximo de 10 refinados con criterio de parada del 1%.

Una vez realizado el cálculo computacional, se muestra la figura con el análisis de tensiones, donde puede verse el rango de tensiones que ha de soportar el brazo.

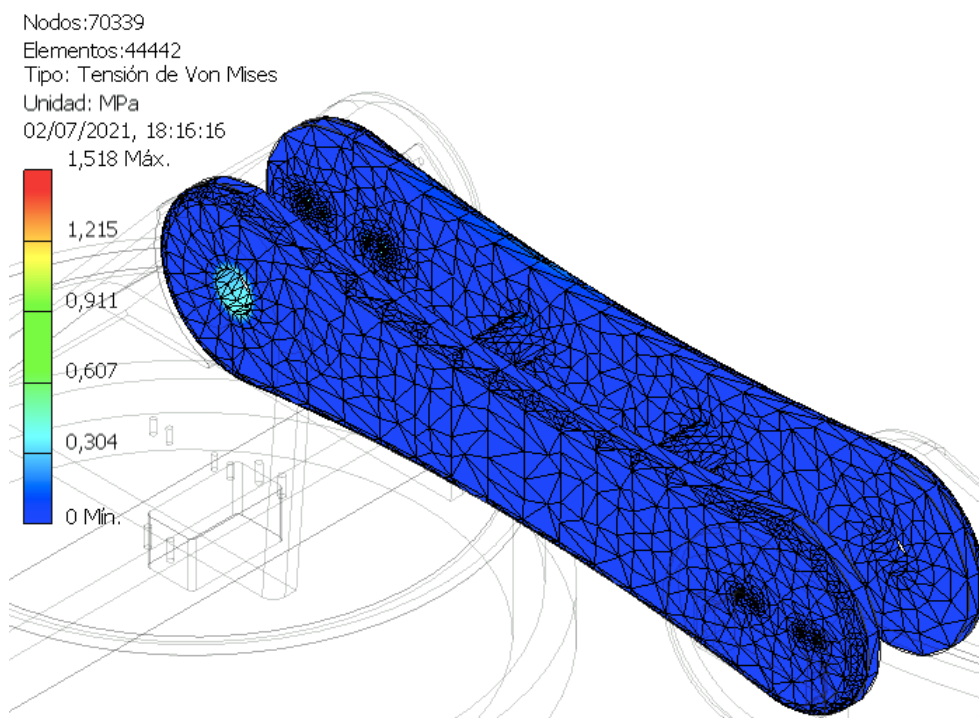


Figura 8.10. Análisis de tensión del brazo con rango de tensión de la barra de colores por defecto.

Las tensiones que tiene que soportar el brazo son muy reducidas, algo que podía preverse ya que la carga que está elevando es de 315 gramos, la cual se encuentra muy lejos de comprometer la resistencia del brazo robótico, ya que la pieza en cuestión tiene un volumen considerable teniendo en cuenta la carga que debe transportar.

Las superficies más solicitadas van a ser las encargadas de soportar los apoyos de la revolución en la articulación hombro-brazo. Se muestra un detalle a continuación sin mallado para que pueda observarse con claridad.

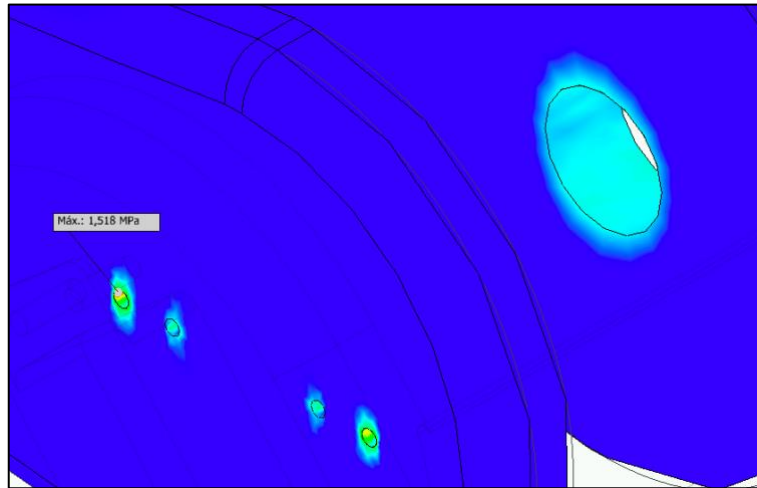


Figura 8.11. Detalle de la zona más solicitada.

Finalmente, introduciendo como valor máximo de la escala de color el límite de resistencia del plástico ABS de 41MPa para poder visualizar con más claridad el análisis de tensión, se observa que la pieza está muy lejos de alcanzar este límite, por lo que se puede garantizar el buen funcionamiento del brazo.

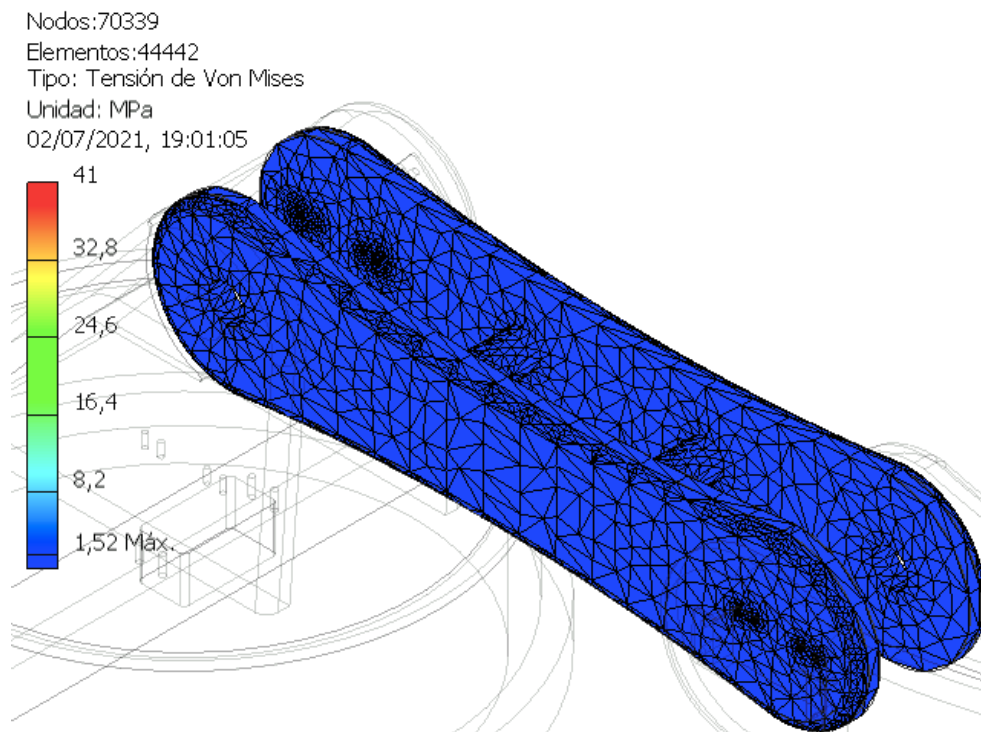


Figura 8.12. Análisis de tensión con tensión máxima impuesta por el material.

Conocidos los resultados de este estudio, en el capítulo de Análisis de Resultados se propondrán posibles mejoras debido al gran margen del que se dispone hasta alcanzar el límite del material.

CAPÍTULO 9: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE MEJORA

Una vez realizados los estudios correspondientes, puede afirmarse que el prototipo virtual funciona correctamente, ya que cumple todas las especificaciones establecidas. Sin embargo, siempre existe posibilidad de mejora.

Como se ha podido observar en el Análisis de Elementos Finitos, el brazo se halla muy lejos de alcanzar su límite de resistencia, por lo que se puede afirmar que el factor limitante de carga depende directamente del par máximo en las articulaciones, o lo que es lo mismo, de la capacidad del servomotor escogido para cada articulación.

Para aumentar la carga máxima que podrá transportar el brazo, se proponen tres medidas que pueden implementarse conjuntamente o por separado.

- Rediseño de las articulaciones mediante transmisión con engranajes.
- Elección de servomotores con un par de torsión más elevado.
- Reducción del material de las piezas.

9.1. ARTICULACIONES MEDIANTE ENGRANAJES

Para realizar este tipo de diseño en la articulación, lo primero sería modificar el modelado de las piezas de forma que los servomotores ya no se encontrarán situados para realizar una transmisión directa.

Una forma de diseñar este tipo de articulación sería situando un eje en la articulación, de forma que se pudiera ubicar un engranaje en éste. De esta manera, podría engranar con otro engranaje que fuera accionado por un servomotor.

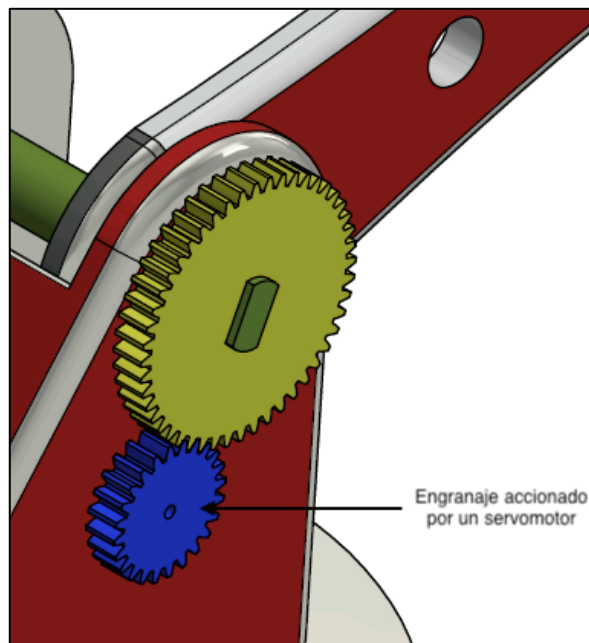


Figura 9.1. Ejemplo simplificado de articulación con transmisión mediante engranajes.

La gran ventaja de este tipo de articulación recae sobre la relación de transmisión de la que disponen los engranajes:

$$i = \frac{Z2}{Z1} = \frac{M2}{M1} \quad (2)$$

Si se realiza la transmisión como en el ejemplo que se ha mostrado anteriormente, los engranajes disponen de una $i=2$, pues en el diseño de los engranajes se ha establecido que los dientes de la segunda rueda sean el doble que los de la primera. Lo que provocaría lo siguiente:

$$M1 = \frac{M2}{2} \quad (3)$$

Tomando como ejemplo el par máximo obtenido en el ensayo a carga máxima de 315 gramos para la articulación hombro-brazo, se obtiene que el par que debe vencer el servomotor es:

$$M1_{carga=315g} = \frac{3773}{2} = 1886,5Nmm = 19,24kgf * cm$$

Se puede apreciar claramente la gran disminución de la capacidad necesaria del servomotor, lo que proporcionaría dos beneficios:

- Posibilidad de aumento de carga: es conveniente tener un rango más amplio de posibles cargas a transportar siempre y cuando no comprometa la resistencia de los materiales del conjunto.
- Utilización de un servomotor con un par de torsión más reducido: utilizar un servo con menos capacidad, de forma genérica conlleva que sea más ligero y que el coste sea más reducido.

Sin embargo, hay un factor importante a tener en cuenta. Cuando se introdujo el funcionamiento de los servomotores en el capítulo de Especificaciones Técnicas, ya se comentó que la mayor parte de los servomotores son de rango de giro limitado, por lo que si se utiliza este tipo de articulación, si los servomotores tienen un rango de 180°, habrá que tener en cuenta que la limitación real de las articulaciones cuando se tenga una relación de transmisión de $i=2$ será de 90°. Es por esto que, si se decide cambiar la articulación de transmisión directa por una transmisión de engranajes, hay que considerar que se sacrificará parte del área de trabajo o deberá buscarse servomotores con un rango de giro superior.

9.2. SELECCIÓN DE UN SERVOMOTOR CON MAYOR PAR DE TORSIÓN

Existe la posibilidad de seleccionar un servomotor con un par de torsión más elevado, sin embargo hay que tener en cuenta que este tipo de servomotores de modelismo diseñados generalmente para prototipos de robótica no suelen superar los 70kgf*cm y la utilización de servomotores industriales no

sería adecuada debido a que el prototipo virtual que se ha diseñado en este TFG es un modelo reducido con fines educativos, no industriales.

No obstante, podría seleccionarse un servomotor de modelismo de mayor capacidad, pues aún existe un margen entre los servomotores propuestos para este modelo virtual y los que existen en el mercado con un par más elevado, siempre teniendo en cuenta que el peso y el precio del servomotor serán más elevados.

Para ilustrar mejor cómo podría modificar la máxima carga utilizar un servomotor de mayor capacidad en las articulaciones, se va a suponer que se utiliza un servomotor de 70kgf*cm para la articulación hombro-brazo. De esta forma, como se hizo en el apartado de Máxima Carga en el capítulo de Simulación Dinámica, se realiza un proceso iterativo de aumento de carga para la situación más desfavorable en la que el brazo se encuentra completamente extendido y se eleva hasta su altura máxima realizando un recorrido de 100°.

Utilizando el mismo criterio que se usó para calcular la carga máxima con el anterior servomotor, se va a situar el límite superior a un 70% de la capacidad, para así asegurar que no se comprometa el buen funcionamiento. De esta forma se tiene:

$$\text{Límite superior art. hombro} - \text{brazo}_{\text{Servo } 70\text{kgfcm}} = 0,7 * 70 = 49\text{kgf} * \text{cm} = 4805,3\text{Nmm}$$

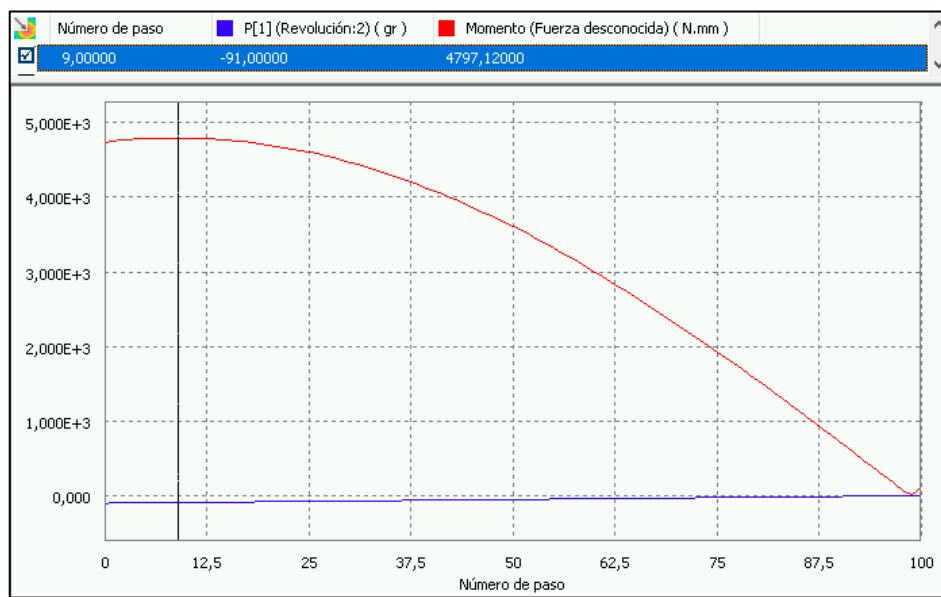


Figura 9.2. Salida de datos Fuerza desconocida de la art. hombro-brazo para máxima carga con un servo de 70kgfcm.

Utilizando la herramienta Fuerza Desconocida, se halla un par máximo de 4797,12Nmm para una carga de 510 gramos, lo que significa que si se utiliza un servomotor con un par de torsión más elevado como es el de 70kgfcm, la carga máxima podría aumentarse hasta 195 gramos.

9.3. REDUCCIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO

Como se ha observado ya con anterioridad en el análisis de tensión que se muestra en el capítulo de Elementos Finitos, la pieza estudiada no presenta ninguna zona que pueda comprometer el correcto funcionamiento, pues el punto más solicitado se halla muy lejos del límite de resistencia.

Teniendo en cuenta ese amplio margen, podría modificarse el modelado de las piezas para reducir espesores con el objetivo de utilizar menos material, ya que disminuiría el peso del conjunto y provocaría una reducción en el par de torsión, lo cual permite cierto aumento en la carga máxima. Además, en caso de que el prototipo virtual se materializara, la utilización de menos material siempre es un beneficio a tener en cuenta, debido a que supone un menor coste en la impresión.

Con el fin de demostrar el cambio que produciría, se ha realizado una prueba rápida reduciendo los espesores de las piezas brazo y antebrazo, de forma que se pueda observar la variación en el par de torsión.

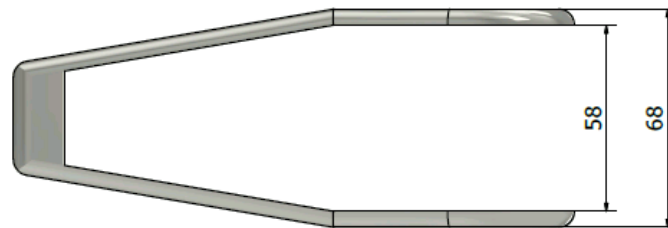


Figura 9.3. Antebrazo con espesor reducido.



Figura 9.4. Brazo con espesor reducido.

Para mostrar la diferencia en el par, se va a realizar el estudio con la carga máxima que disponía el prototipo original, de forma que pueda apreciarse la variación en el par.

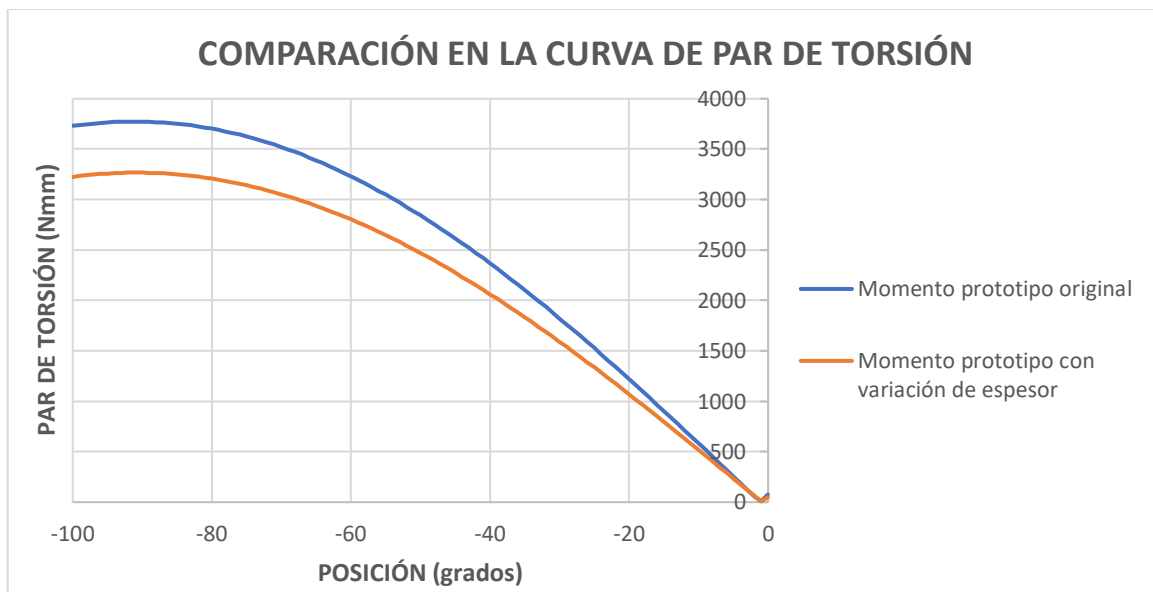


Figura 9.5. Gráfico de comparación en la curva de par de torsión para una carga de 315 gramos.

Como era de esperar, al reducir el peso del prototipo, el momento generado disminuye. Aunque no existe una variación muy elevada, si se realizaran cambios en todas las piezas para reducir el material, podría disminuirse aun más el par necesario. Además produciría una reducción en el coste si se imprimiera el prototipo, pues requeriría una cantidad menor de material.

Aunque se sabe que se contaba con un amplio margen en el análisis de tensión hasta alcanzar el límite de resistencia, se ha realizado un análisis para asegurar que esta opción de mejora es viable. En el trazado de convergencia puede verse que en la quinta iteración ya se proporciona una solución con un error menor al 1%.

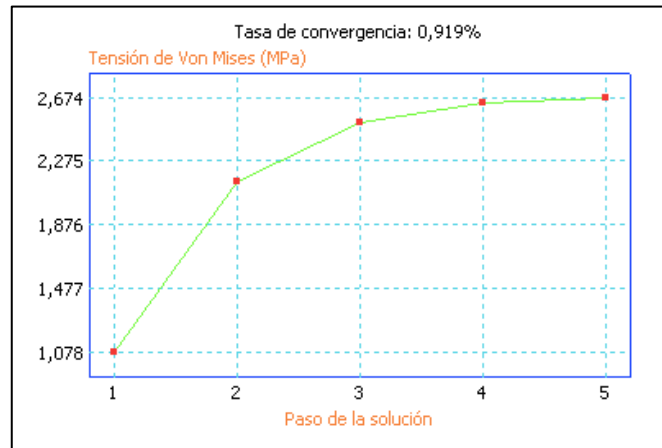


Figura 9.6. Trazado de convergencia del análisis de tensión del prototipo virtual modificado.

Al reducir el espesor en las piezas, puede verse que las tensiones han aumentado ligeramente ya que el punto más solicitado, ahora ha de soportar una mayor tensión. Sin embargo, toda la pieza se encuentra lejos de alcanzar el límite de resistencia, por lo que puede afirmarse que es posible realizar esta reducción de material sin comprometer el funcionamiento del prototipo virtual.

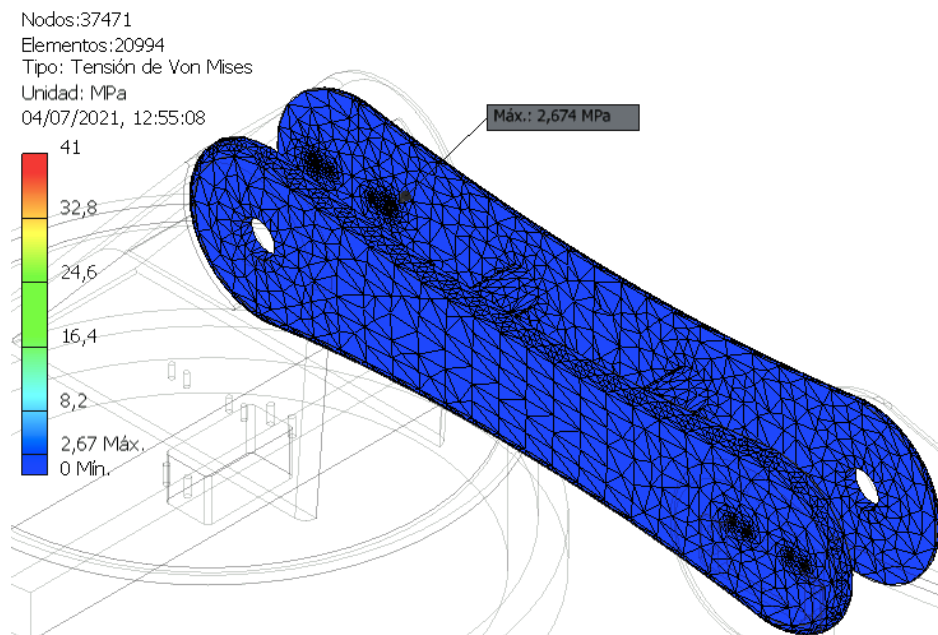


Figura 9.7. Análisis de tensión del prototipo virtual modificado.

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES

Se puede concluir que gracias a este proyecto de Fin de Grado se ha podido poner en práctica aquellos conocimientos adquiridos durante los cuatro cursos del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales. Además, la oportunidad de realizar un proyecto como éste, acerca al alumno a un proceso de toma de decisiones y resolución de problemas que genera una gran motivación y extrae el potencial del alumno acercándolo un poco más a las situaciones reales del mundo laboral como ingeniero.

Teniendo en cuenta los objetivos marcados al principio de esta memoria, puede asegurarse que se ha cumplido satisfactoriamente todo lo que se buscaba. Se ha conseguido un conocimiento mucho más profundo en el desarrollo de un prototipo virtual, donde se han podido realizar todas las fases de diseño, desde el modelado hasta la generación de planos, además de la validación del prototipo virtual mediante la simulación dinámica y el análisis de tensiones, concluyendo en un proyecto que cumple correctamente todas las especificaciones establecidas.

Cabe destacar lo imprescindibles que han sido los conocimientos de la asignatura de Ingeniería Gráfica para la realización de este TFG ya que es crucial partir de un conocimiento básico de la herramienta de Autodesk Inventor. Pero como se ha comentado anteriormente, han sido muchas las asignaturas que han resultado útiles para la materialización de este proyecto, tales como Métodos Matemáticos, donde se aprendió el método de los elementos finitos y cómo se realiza e interpreta un análisis de tensión; Teoría de Maquinas, donde se introdujo el funcionamiento de las ruedas dentadas y su funcionamiento; o Proyectos, donde no solo se aprendió cómo realizar un buen presupuesto, si no cómo enfocar un proyecto y las fases para su creación. En conclusión, ha sido el conjunto de todas las asignaturas que se han impartido en este grado, junto con los conocimientos obtenidos tras el proceso de búsqueda de información centrados en este TFG, los que han hecho posible que este proyecto se haya podido realizar.

Por último, aunque el prototipo virtual realizado se trata de un modelo reducido que no puede utilizarse para aplicaciones industriales, gracias a este proyecto se demuestra que es posible obtener pequeños modelos de coste reducido que pueden implementarse en las aulas de los colegios para asignaturas como Tecnología, de forma que se incentive a los más jóvenes a despertar su interés por la robótica y se les acerque al gran mundo de la ingeniería y su amplio abanico de posibilidades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Apuntes de la asignatura *Ingeniería Gráfica*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [2]. Autodesk. <<https://www.autodesk.es/products/inventor/features>> [Consulta: 30 de mayo de 2021].
- [3]. Barrientos, A. y otros. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: Ed. McGraw-Hill.
- [4]. Contreras, L. (2019). "El filamento de ABS en la impresión 3D" en *3Dnatives*, 6 de junio. <<https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>> [Consulta: 1 de junio de 2021].
- [5]. EDS Robotics. <<https://www.edsrobotics.com/blog/evolucion-robotica-industrial/>> [Consulta: 27 de marzo de 2021].
- [6]. García, A. (2016). "¿Qué es y como funciona un servomotor?" en *Panamahitek*, 2 de diciembre. <<http://panamahitek.com/que-es-y-como-funciona-un-servomotor/>> [Consulta: 2 de junio de 2021].
- [7]. García, B. (2018). "George Devol, el creador de la robótica industrial" en *Blogthinkbig*, 20 de agosto. <<https://blogthinkbig.com/george-devol-el-creador-de-la-robotica-industrial>> [Consulta: 27 de marzo de 2021].
- [8]. González, V. R. (2002). "Estructura de un robot industrial" en *OpenVRG*, 2 de mayo. <http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm> [Consulta: 28 de marzo de 2021].
- [9]. Ingeoexpert. <<https://ingeoexpert.com/articulo/fundamento-y-origen-del-metodo-de-los-elementos-finitos-mef/>> [Consulta: 21 de junio de 2021].
- [10]. Mirlisenna, G. (2016). "Método de los elementos finitos: ¿Qué es?" en *ESSS*, 22 de enero. <<https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>> [Consulta: 30 de mayo de 2021].
- [11]. Rentería, A. y Rivas, M. (2000). *ROBÓTICA INDUSTRIAL. Fundamentos y aplicaciones*. Madrid: Ed. McGraw-Hill.
- [12]. Siim and Co., S.L. <<http://www.siim.com/docs/RAE-1018.pdf>> [Consulta: 11 de junio de 2021].
- [13]. Younis. W. (2012). *Inventor y su simulación con ejercicios prácticos*. Ed. Marcombo.

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

PRESUPUESTO

Código	Ud.	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
1.		DESARROLLO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO			
1.1.	-	Documentación y planteamiento del proyecto Se incluye la definición del alcance y objetivos del proyecto así como la búsqueda de información sobre robótica industrial, concretizando en el funcionamiento de los brazos robóticos articulados.			
	h	Graduada en Ingeniería de Tecnologías Industriales	25	20	500
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	500	10
		Coste total			510 €
1.2.	-	Desarrollo del prototipo virtual Se incluye la realización del modelado paramétrico de cada pieza, así como la búsqueda de las piezas necesarias del centro de contenido y el posterior ensamblaje del conjunto.			
	h	Graduada en Ingeniería de Tecnologías Industriales	100	20	2.000
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	2.000	40
		Coste total			2.040 €
1.3.	-	Simulación dinámica Se incluye el proceso de aprendizaje de utilización de la herramienta, así como los estudios realizados y la solución de los posibles problemas.			
	h	Graduada en Ingeniería de Tecnologías Industriales	50	20	1.000
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	1.000	20
		Coste total			1.020 €
1.4.	-	Análisis de tensión mediante Elementos Finitos Se incluye el proceso de aprendizaje de utilización de la herramienta, así como los estudios realizados y la solución de los posibles problemas.			
	h	Graduada en Ingeniería de Tecnologías Industriales	30	20	600
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	600	12
		Coste total			612 €

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

Código	Ud.	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
1.5.	-	Generación de los planos Se incluye la realización de todos los planos de detalle de las piezas no normalizadas, así como los planos de conjunto.			
	h	Graduada en Ingeniería de Tecnologías Industriales	25	20	500
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	500	10
	Coste total				510 €
1.6.	-	Desarrollo de la memoria Redacción y revisión de la memoria, así como la generación del presupuesto.			
	h	Graduada en Ingeniería de Tecnologías Industriales	70	20	1.400
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	1.400	28
	Coste total				1.428 €

Código	Ud.	Descripción	Cantidad	Precio	Importe
2.	MATERIALES Y HERRAMIENTAS				
2.1.	-	Amortización de software y hardware Se incluye la amortización tanto de las licencias utilizadas como del ordenador.			
	h	Ordenador portátil Macbook Air	300	0,07245	21,735
	h	Licencia de Autodesk Inventor	230	1,443	331,89
	h	Licencia de Microsoft Office	70	0,0345	2,415
	%	Costes directos complementarios (2%)	0,02	356,04	7,1208
	Coste total				363,16 €

JUSTIFICACIÓN DE LOS PRECIOS UNITARIOS DE SOFTWARE Y HARDWARE

Ordenador portátil Macbook Air

El precio del ordenador es de 1.449€ y se estima que la vida útil de la que dispone es de 10 años. Aproximando unos 250 días laborables al año con una jornada de 8 horas, se tiene una media de 2.000h, por lo tanto el precio unitario se obtiene realizando la siguiente operación:

$$\text{Precio unitario ordenador} = \frac{1.449 \text{ €}}{10 \text{ años}} * \frac{\text{año}}{2.000 \text{ h}} = 0,07245 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

Licencia de Autodesk Inventor

Consultando en la pagina oficial de Autodesk se obtiene que la licencia del programa es de 2.886€/año. De esta forma se obtiene el precio unitario de la siguiente manera:

$$\text{Precio unitario Licencia Autodesk Inventor} = \frac{2.886\text{€}}{\text{año}} * \frac{\text{año}}{2.000h} = 1,443 \frac{\text{€}}{h}$$

Licencia de Microsoft Office

La licencia de Microsoft 365 tiene un coste de 69€/año. Para obtener el precio unitario se realiza la siguiente operación:

$$\text{Precio unitario Licencia Microsoft Office} = \frac{69\text{€}}{\text{año}} * \frac{\text{año}}{2.000h} = 0,0345 \frac{\text{€}}{h}$$

PRESUPUESTO TOTAL		
Código	Descripción	Importe
1.	DESARROLLO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO	6.120 €
1.1	Documentación y planteamiento del proyecto	510 €
1.2	Desarrollo del prototipo virtual	2.040 €
1.3	Simulación Dinámica	1.020 €
1.4	Análisis de tensión mediante Elementos Finitos	612 €
1.5	Generación de los planos	510 €
1.6	Desarrollo de la memoria	1.428 €
2.	MATERIALES Y HERRAMIENTAS	363,16 €
2.1	Amortización de software y hardware	363,16 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL		6.483,16 €
Beneficio Industrial (6%)		388,99 €
Gastos Generales (13%)		842,81 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA		7.714,96 €
IVA (21%)		1.620,14 €
PRESUPUESTO TOTAL		9.335,10 €

El presupuesto asciende a la cantidad de:

NUEVE MIL TRESCIENTOS TREINTA Y CINCO EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS

Valencia, 5 de julio de 2021.

Desarrollo del prototipo virtual parametrizado de un brazo robótico articulado. Simulación dinámica y análisis mediante elementos finitos.

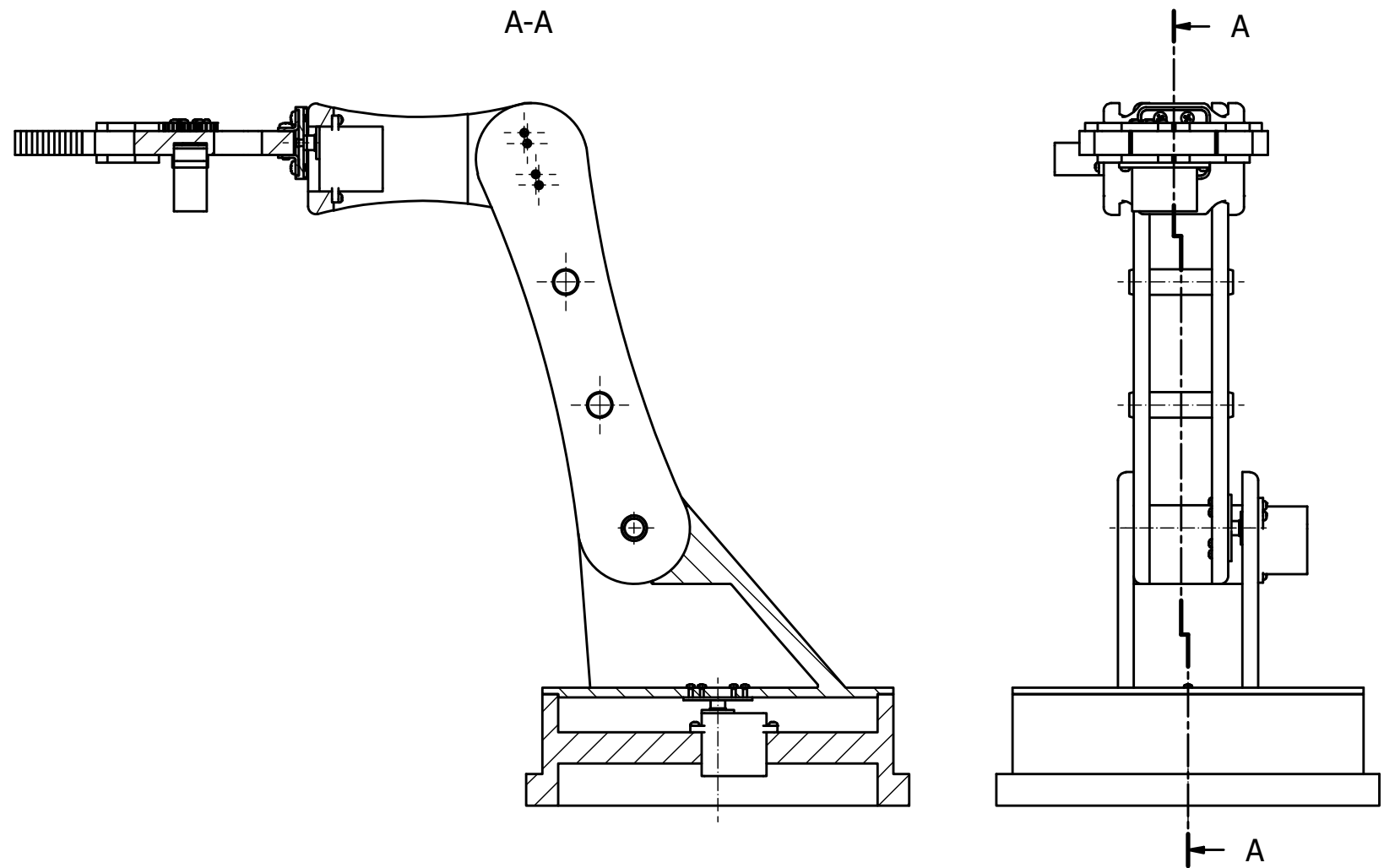
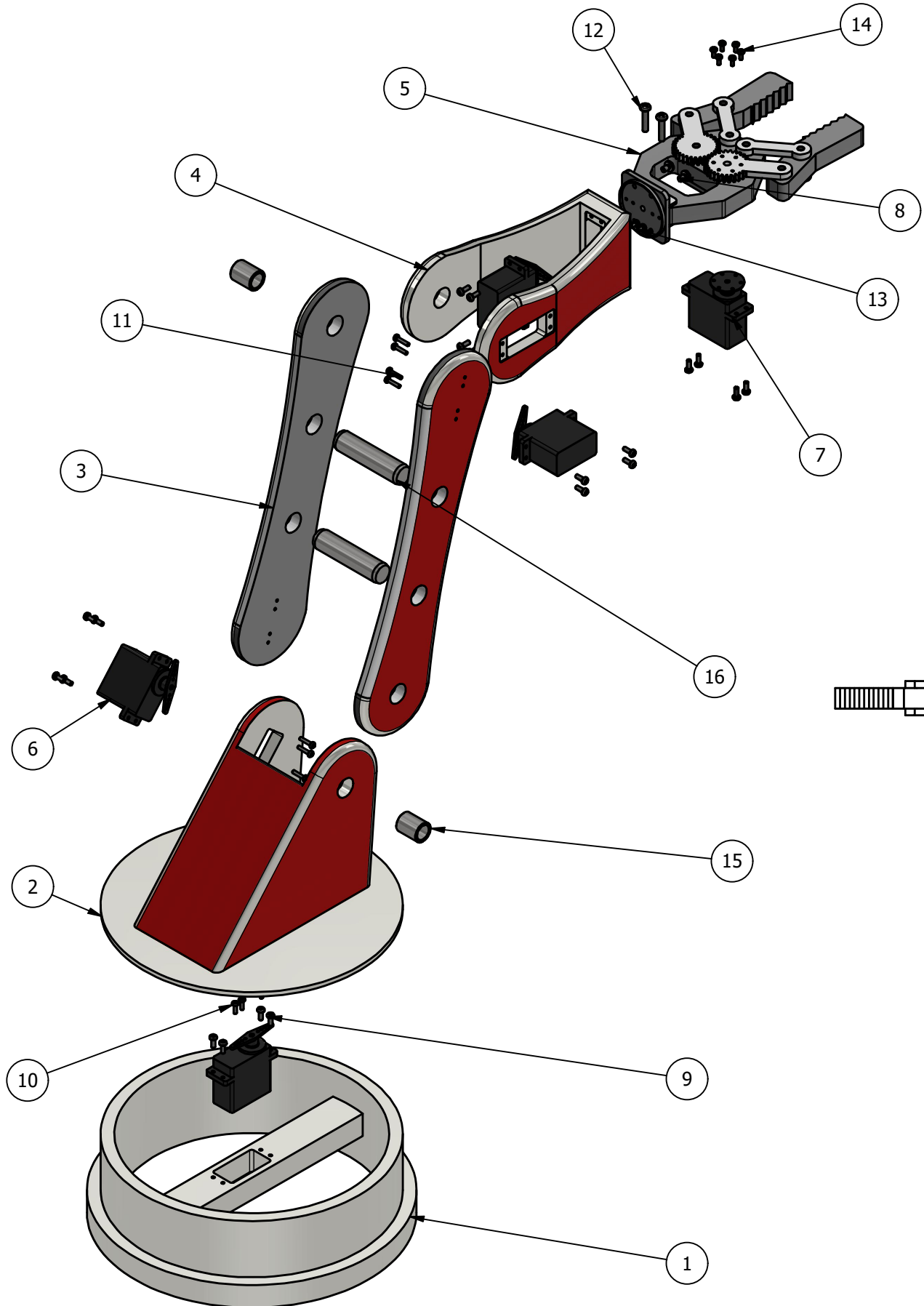
PLANOS

ÍNDICE DE PLANOS

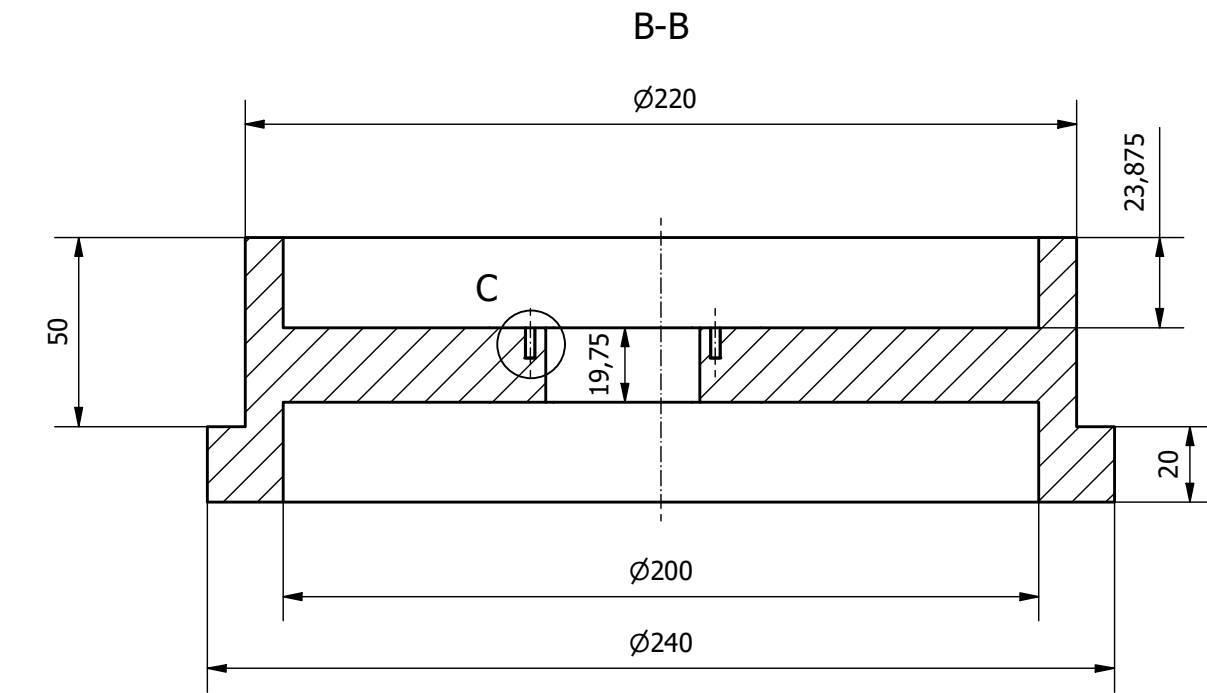
PLANO Nº 1: CONJUNTO BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO	1
PLANO Nº 2: BASE	2
PLANO Nº 3: HOMBRO	3
PLANO Nº 4: ANTEBRAZO Y BRAZO	4
PLANO Nº 5: SUBCONJUNTO GRIPPER	5
PLANO Nº 6: CONECTOR, SOPORTE Y BARRA DE ARTICULACIÓN	6
PLANO Nº 7: CHAPA GRIPPER.....	7
PLANO Nº 8: PINZA Y PASADORES.....	8
PLANO Nº 9: ENGRANAJES RECTOS 1 Y 2	9

LISTA DE PIEZAS

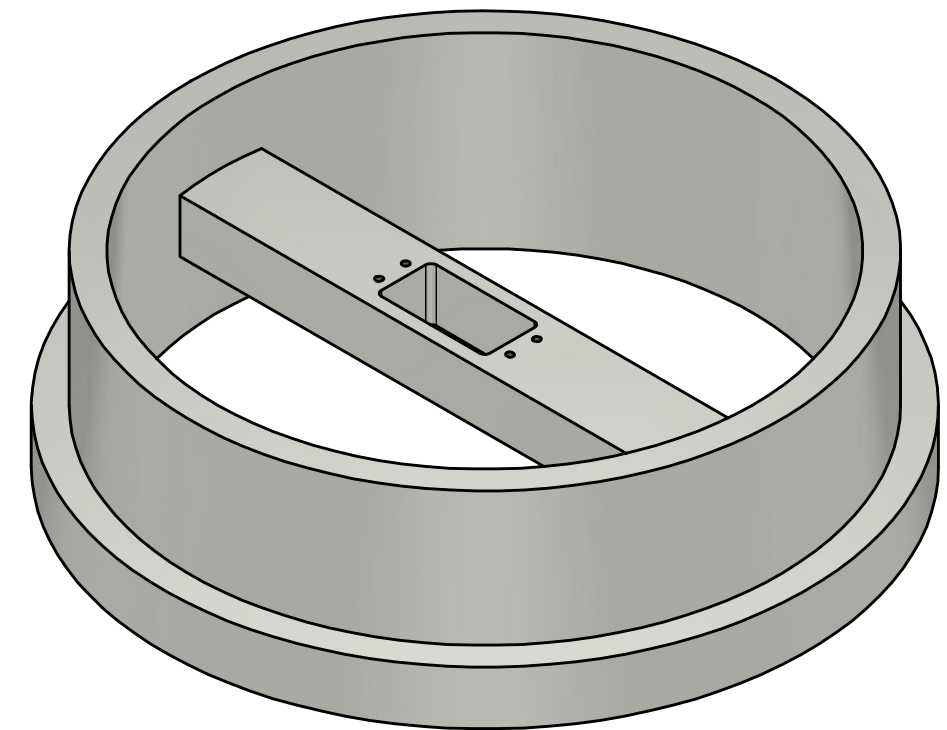
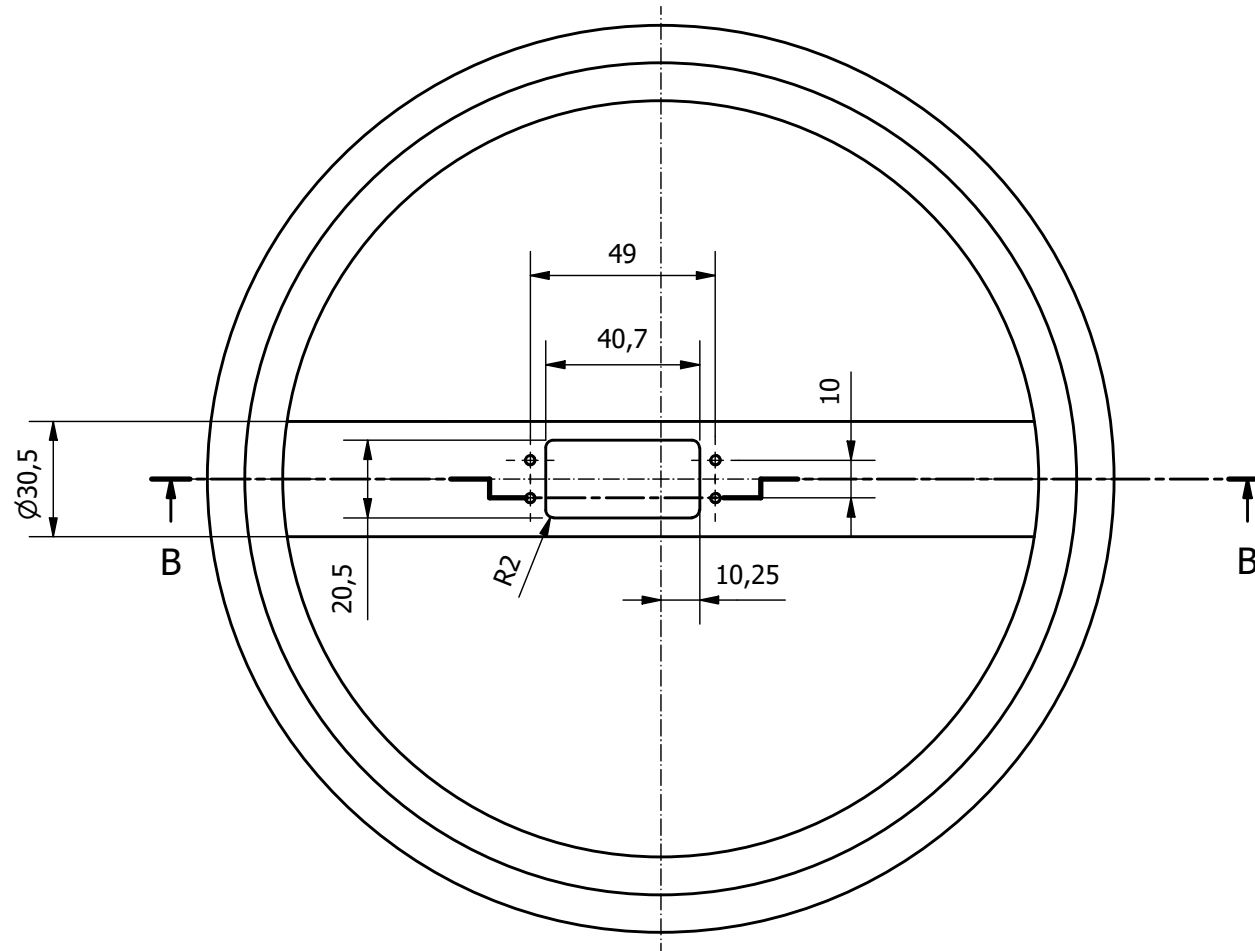
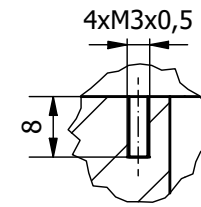
MARCA	CTDAD	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	1	Base	
2	1	Hombro	
3	2	Brazo	
4	1	Antebrazo	
5	1	Subconjunto Gripper	
6	4	Servomotor cabeza alargada	
7	1	Servomotor cabeza circular	
8	4	ISO 7045 - M4 x 6 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
9	20	ISO 7045 - M3 x 8 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
10	4	ISO 7045 - M2,5 x 8 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
11	8	ISO 7045 - M2,5 x 12 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
12	2	ISO 7045 - M4 x 20 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
13	4	ISO 7045 - M2,5 x 5 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
14	6	ISO 7045 - M2,5 x 6 - 4.8 - H	Tornillo de cabeza cilíndrica redondeada con hueco cruciforme tipo H - clase A
15	2	ISO 2795 - 12 x 16 x 20	Rodamiento normal - Casquillos sinterizados - Cotas y tolerancias - Rodamientos de rodillos cilíndricos
16	2	ISO 2338 - 16 h8 x 65	Pasador cilíndrico



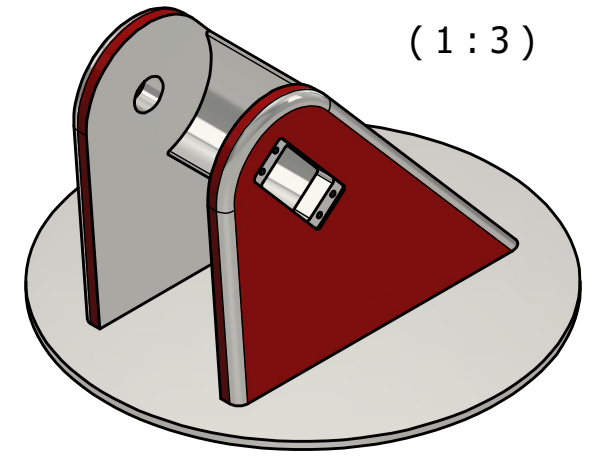
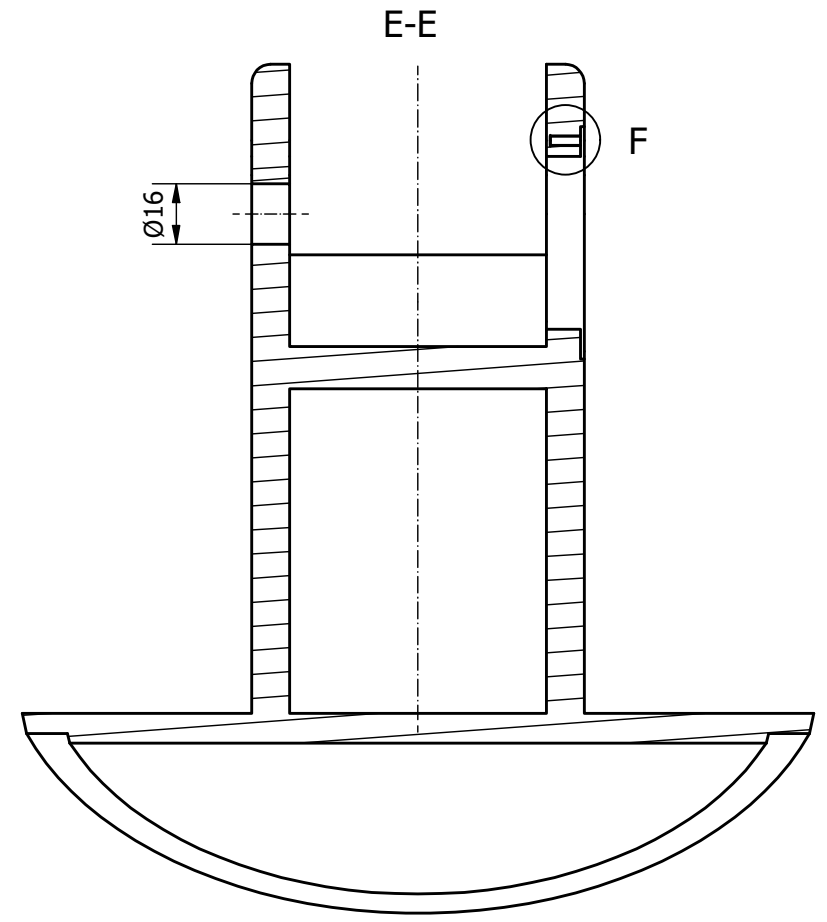
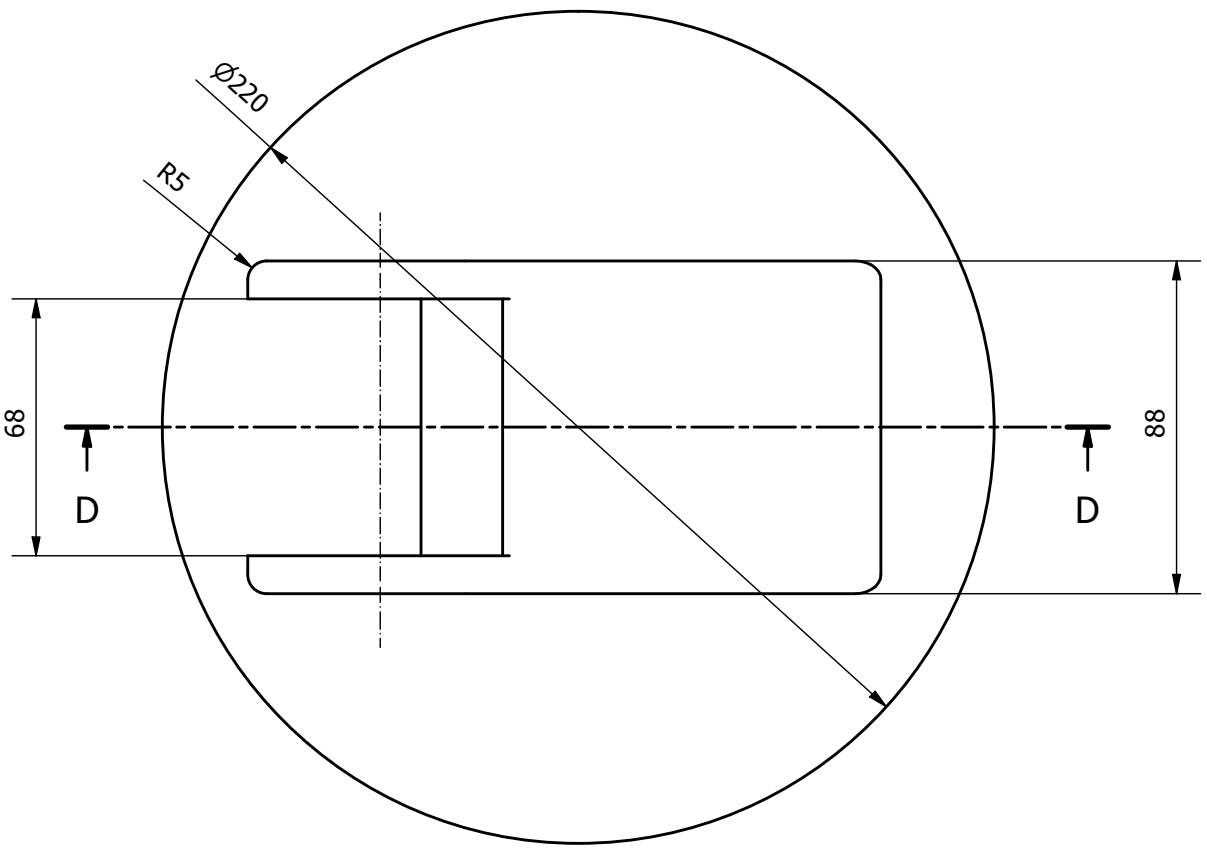
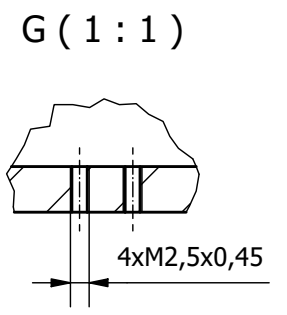
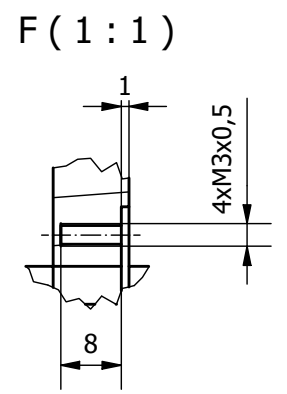
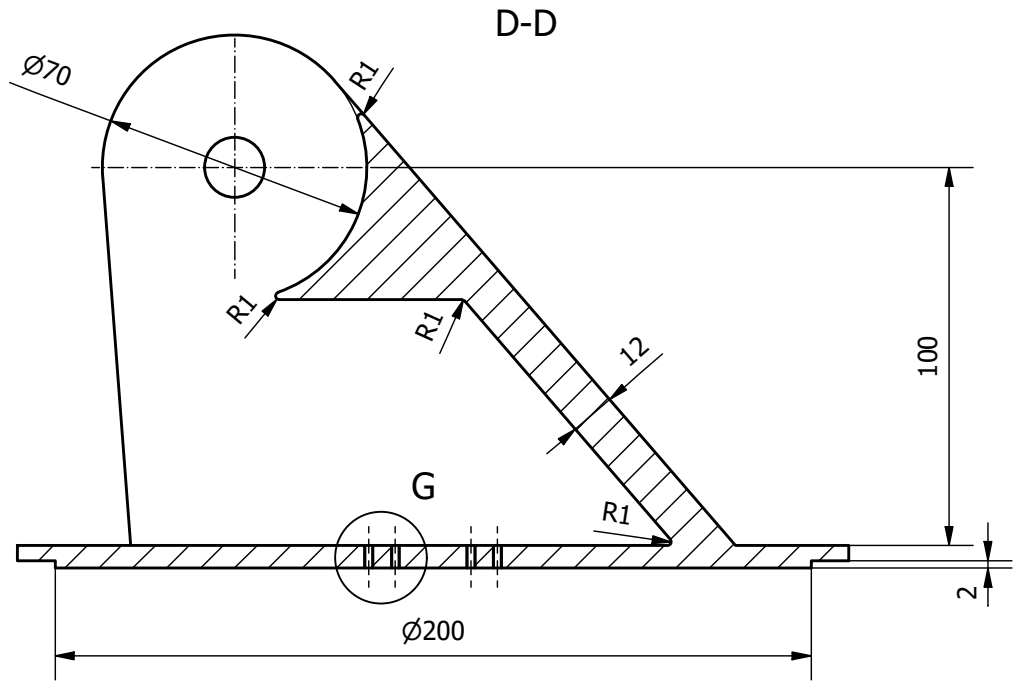
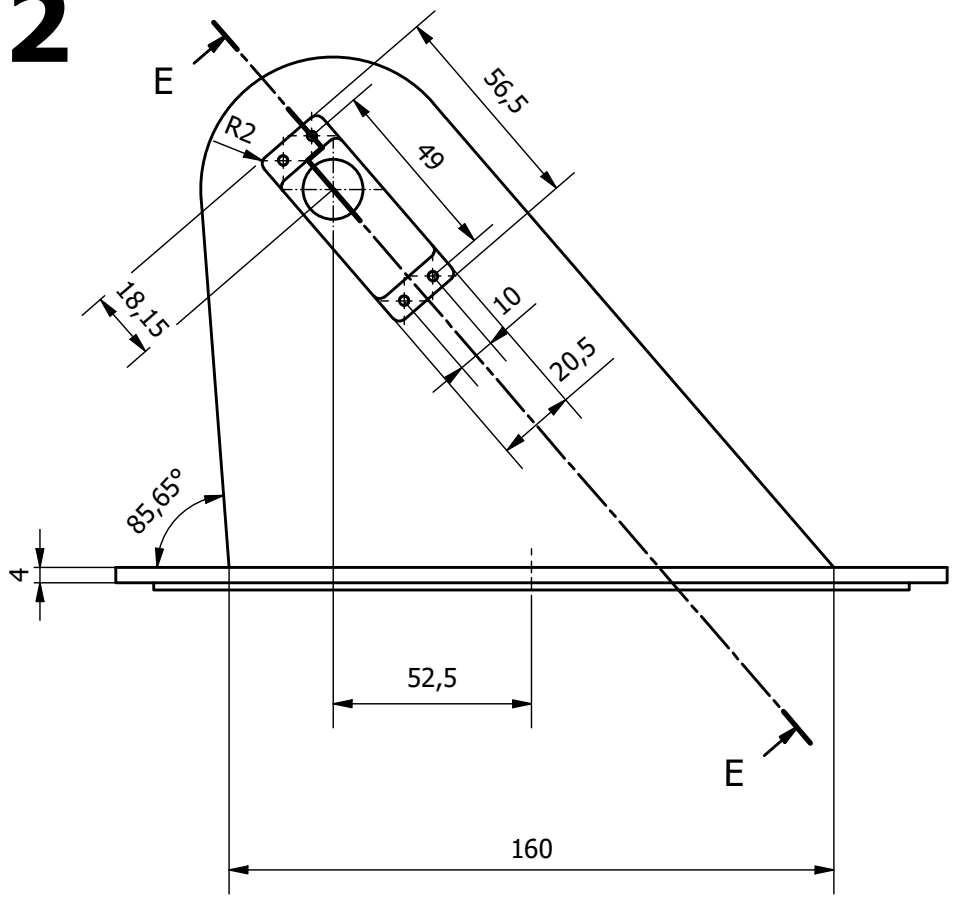
1



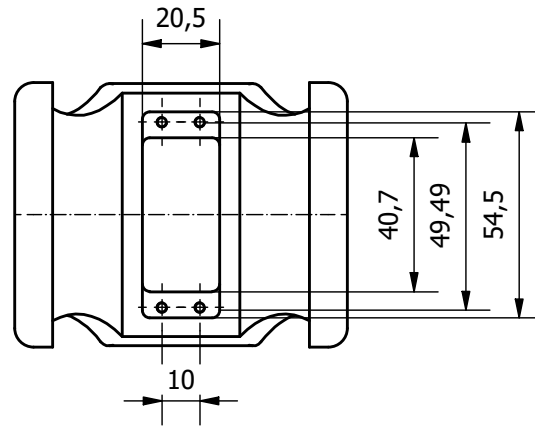
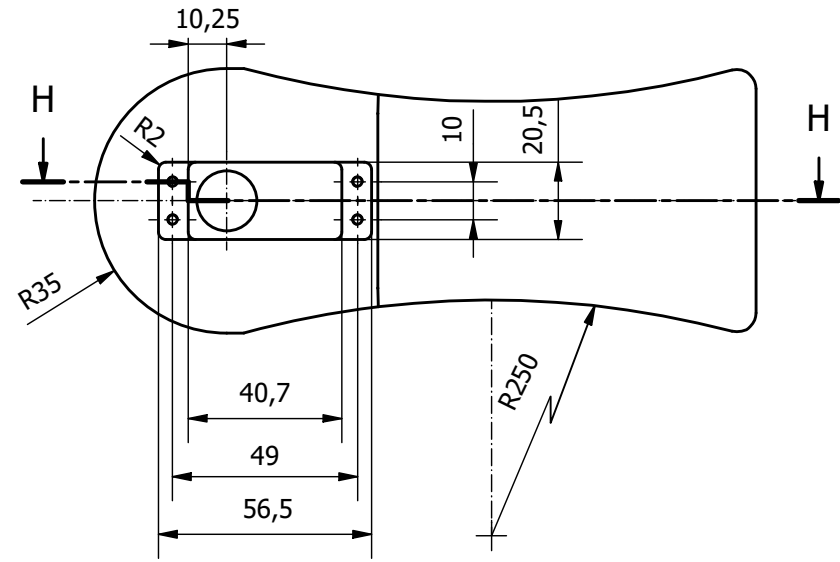
C (1:1)



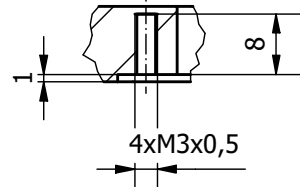
2



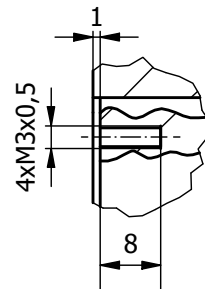
4



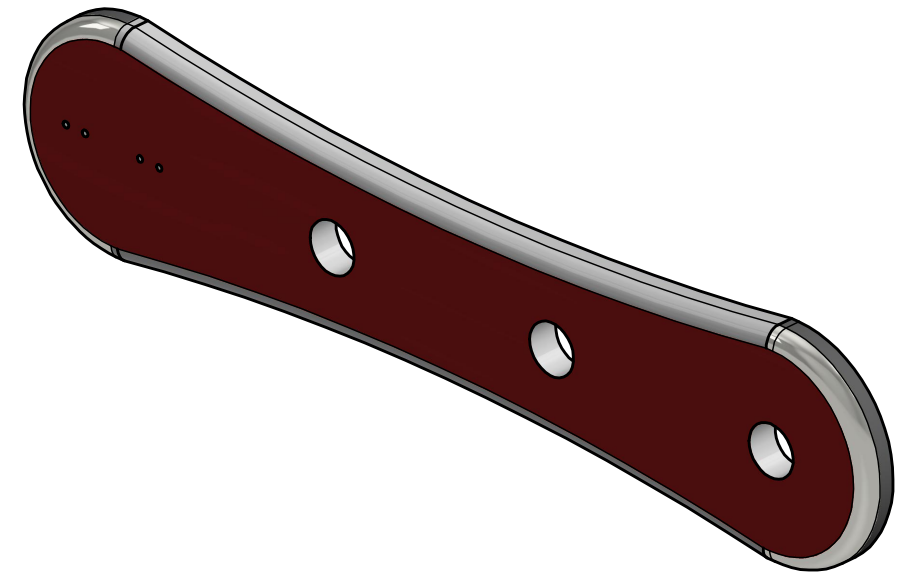
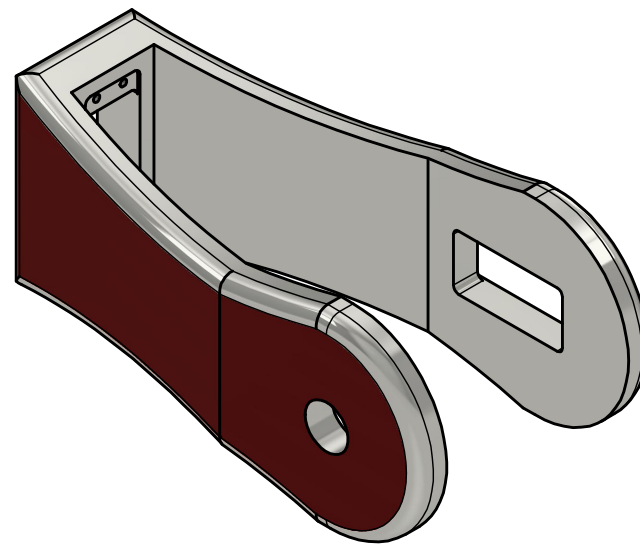
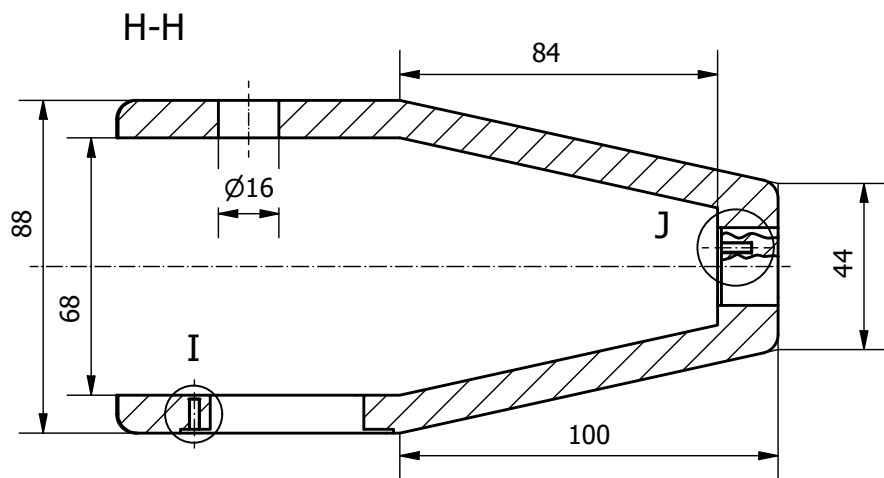
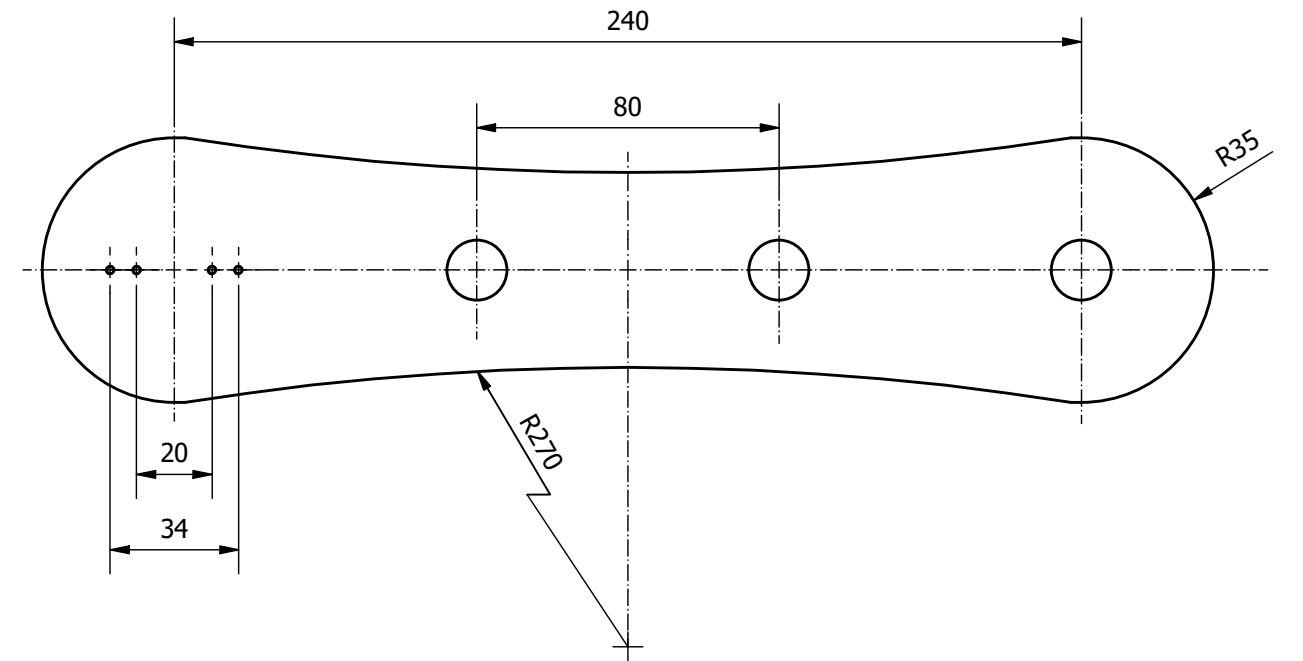
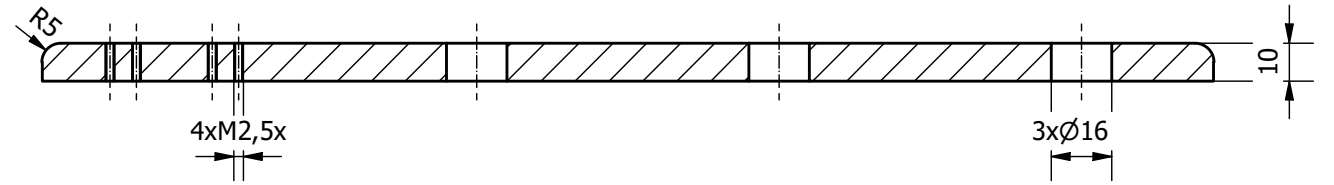
I (1:1)



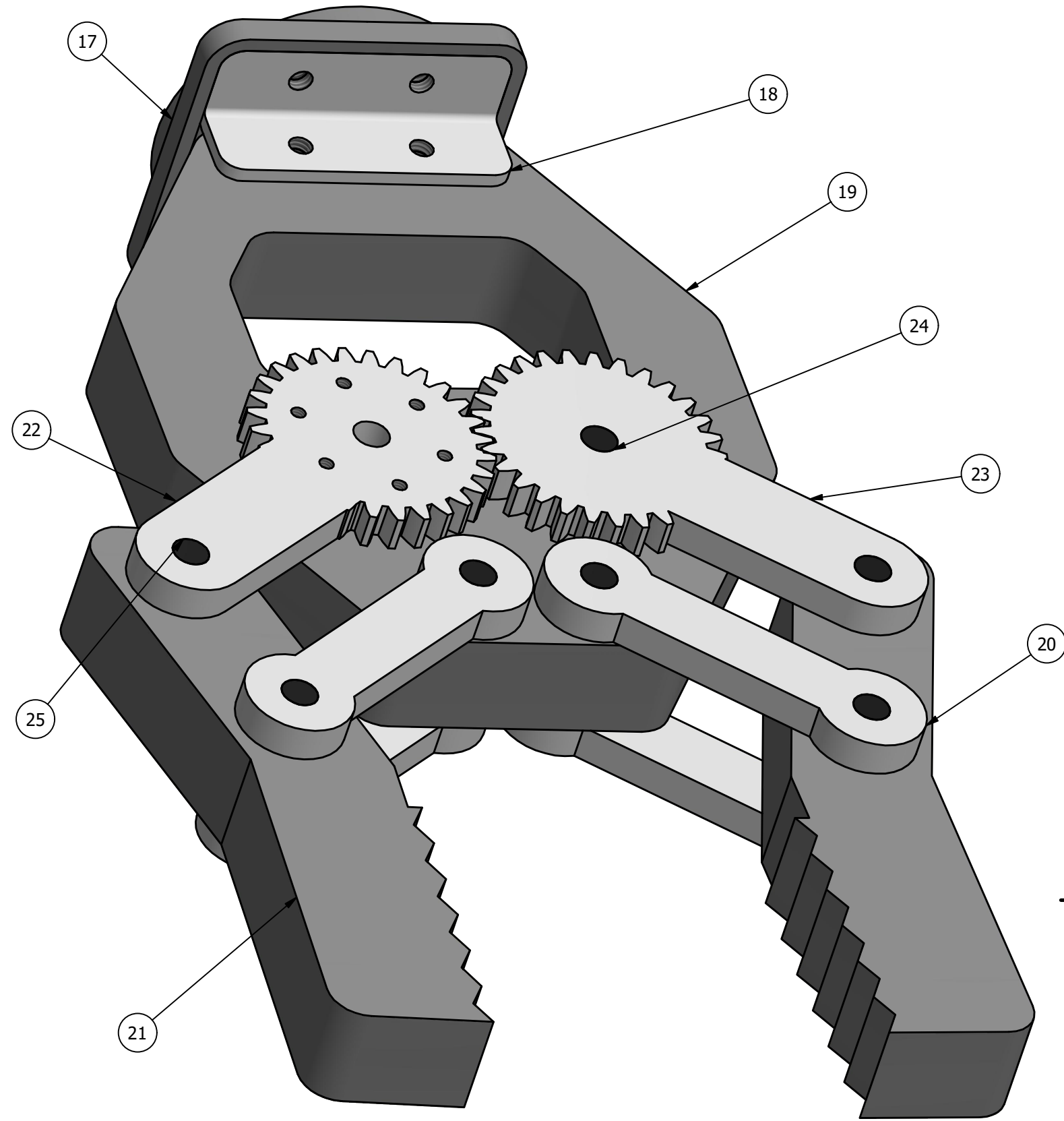
J (1:1)



3

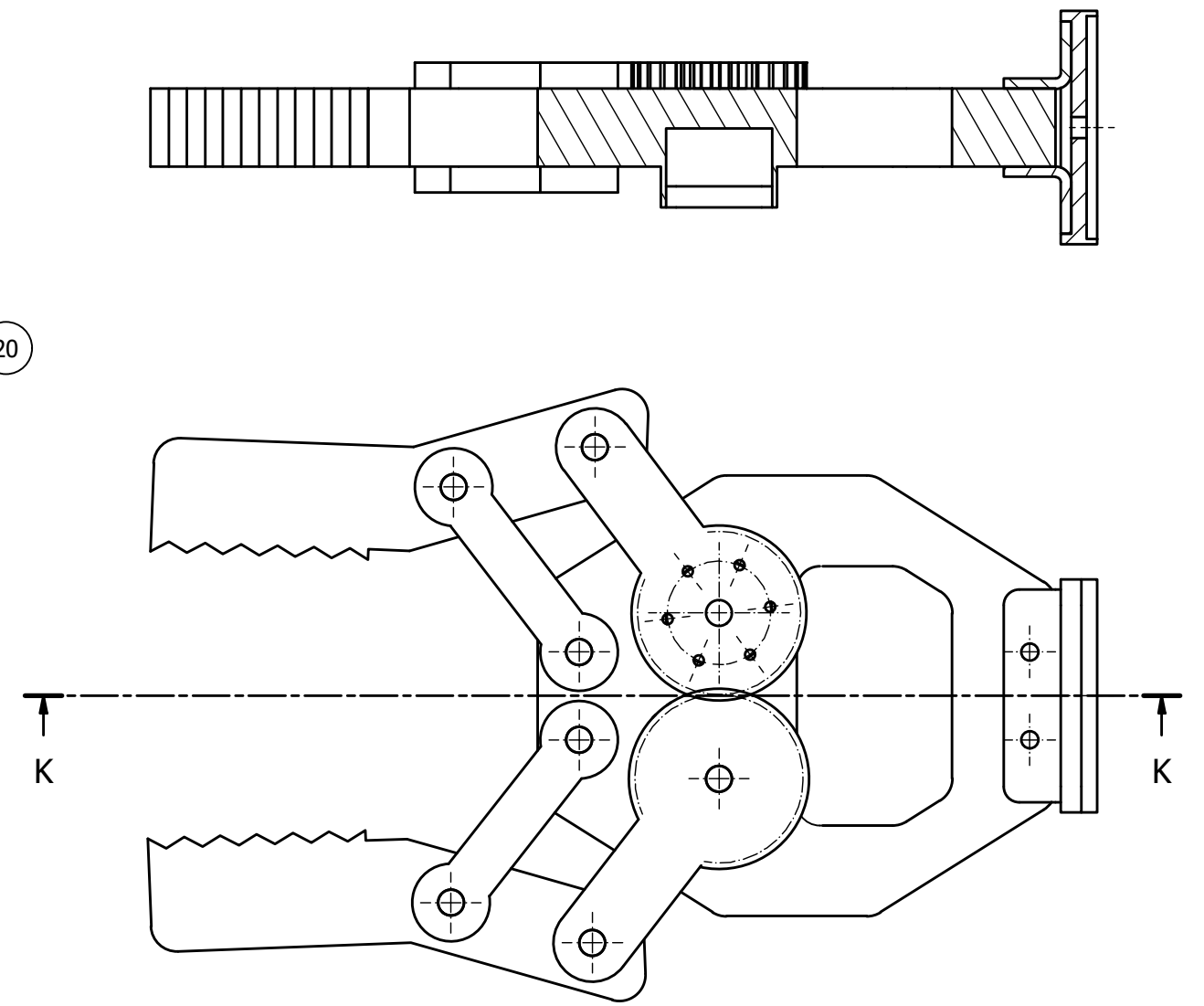


(3:2)

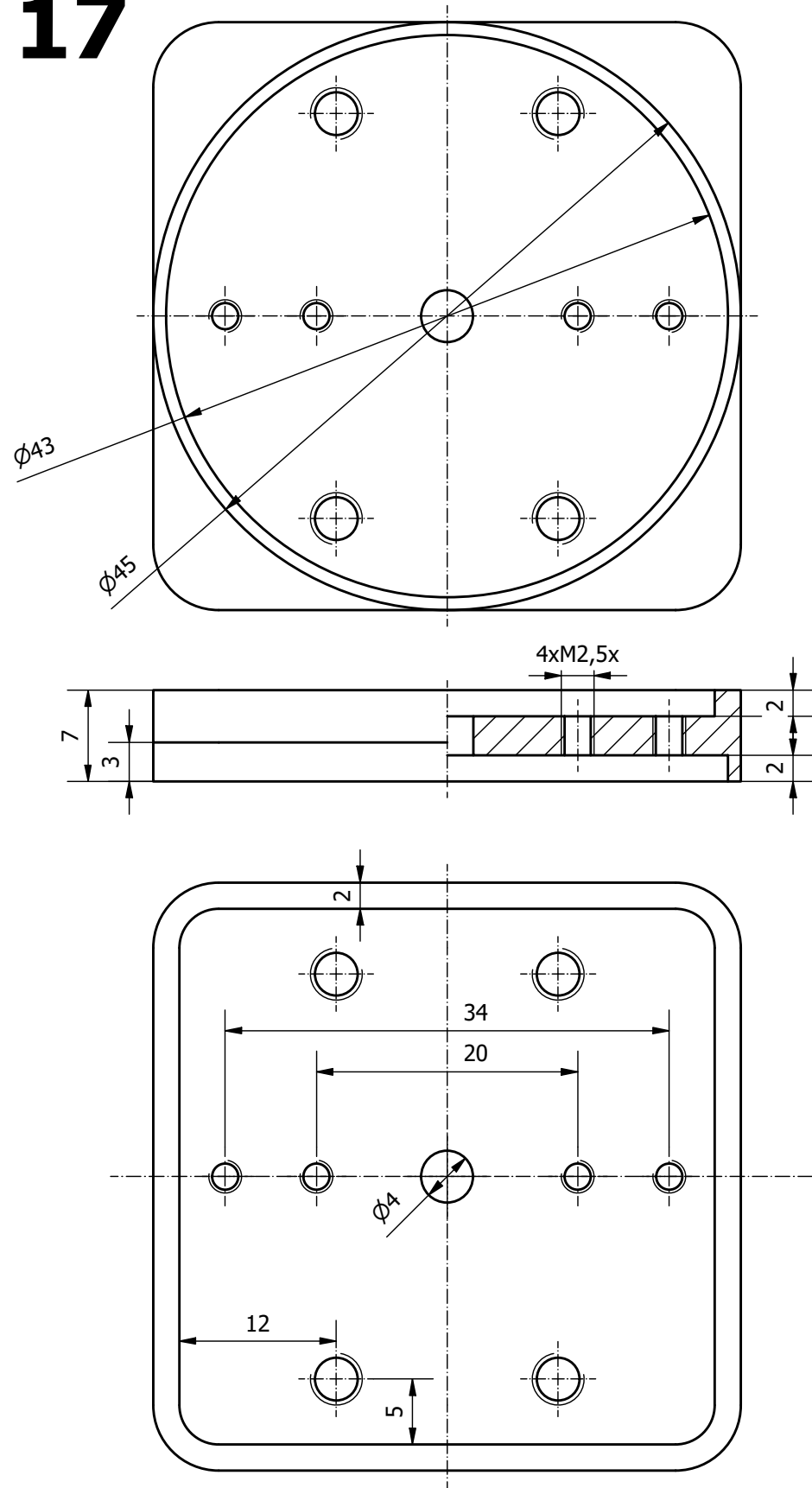


LISTA DE PIEZAS			
MARCA	CTDAD	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
17	1	Conector	
18	2	Soporte	
19	1	Chapa	
20	4	Barra de articulación	
21	2	Pinza	
22	1	Engranaje recto 1	
23	1	Engranaje recto 2	
24	1	Pasador $\varnothing 5 \times 10 \text{mm}$	
25	2	Pasador $\varnothing 5 \times 20 \text{mm}$	
26	4	Pasador $\varnothing 5 \times 25 \text{mm}$	

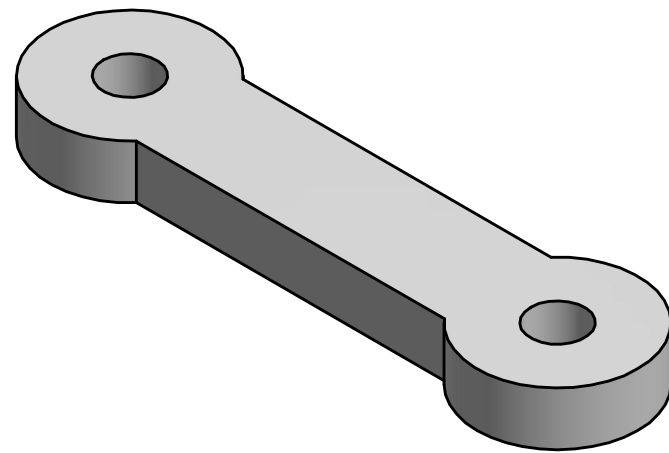
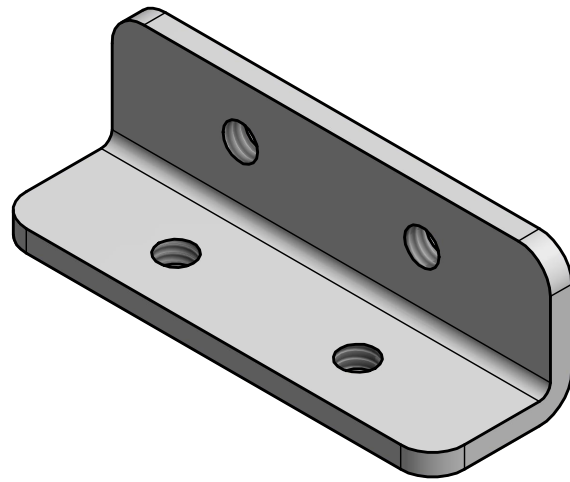
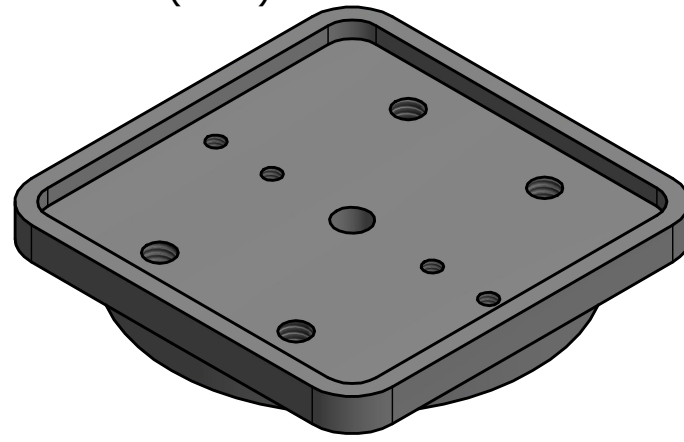
K-K



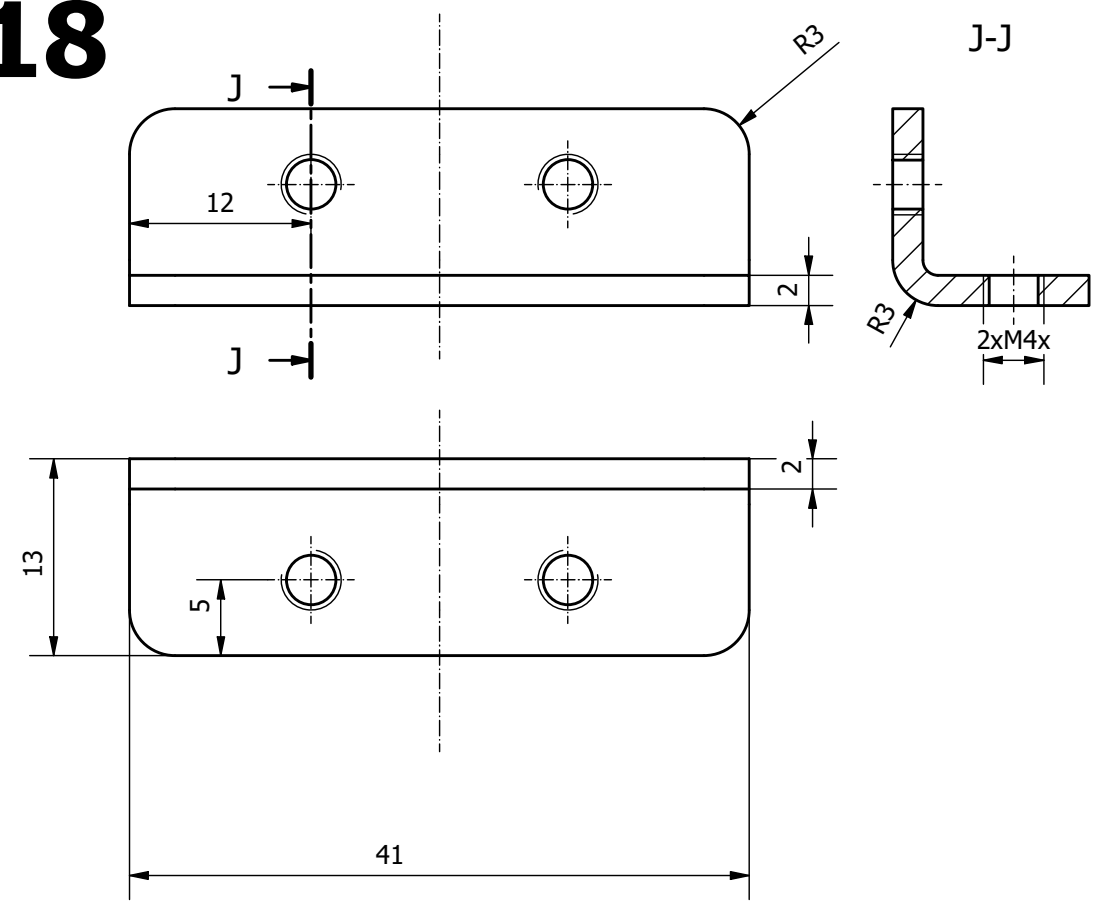
17



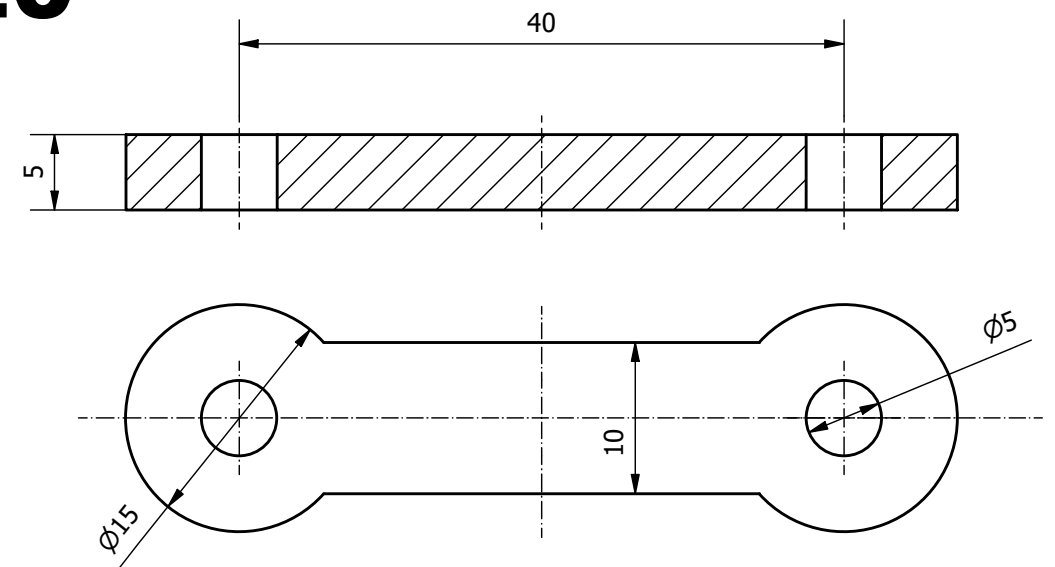
(3:2)



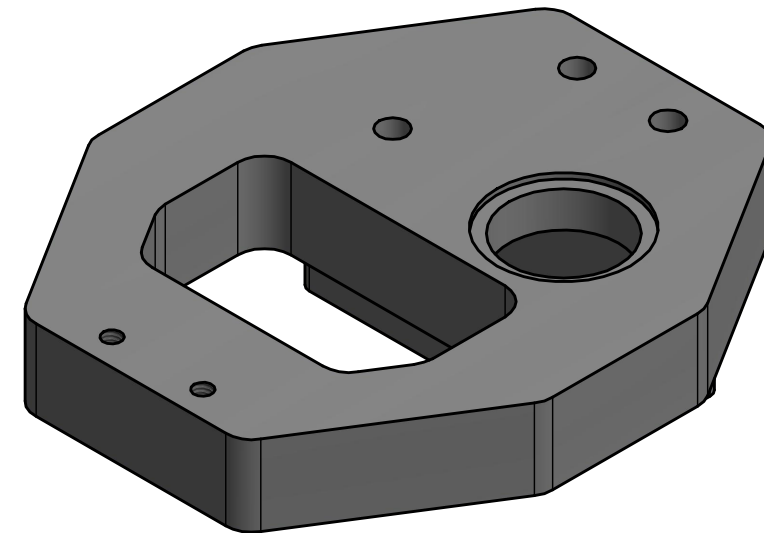
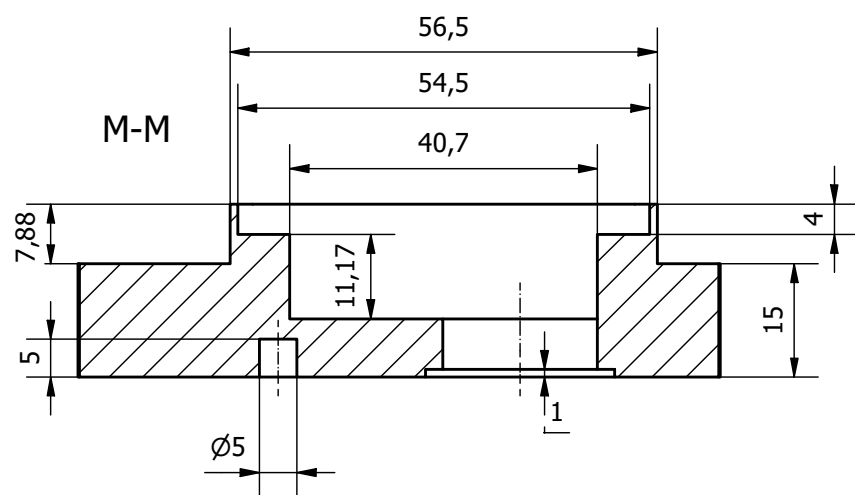
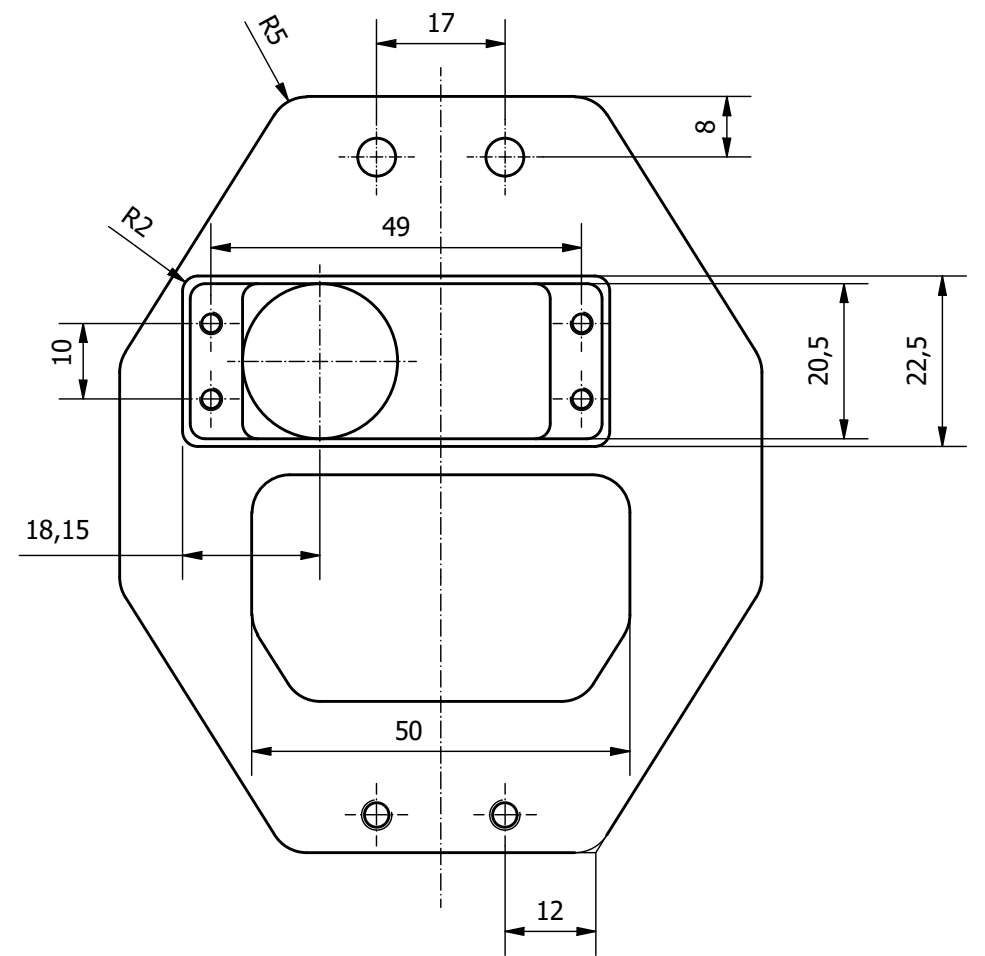
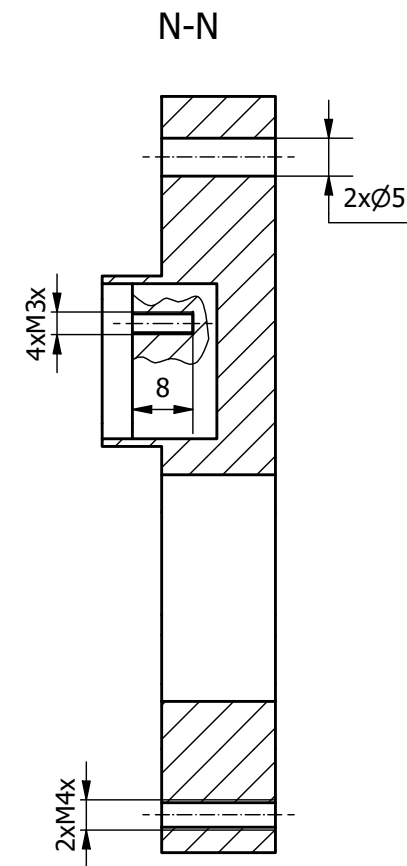
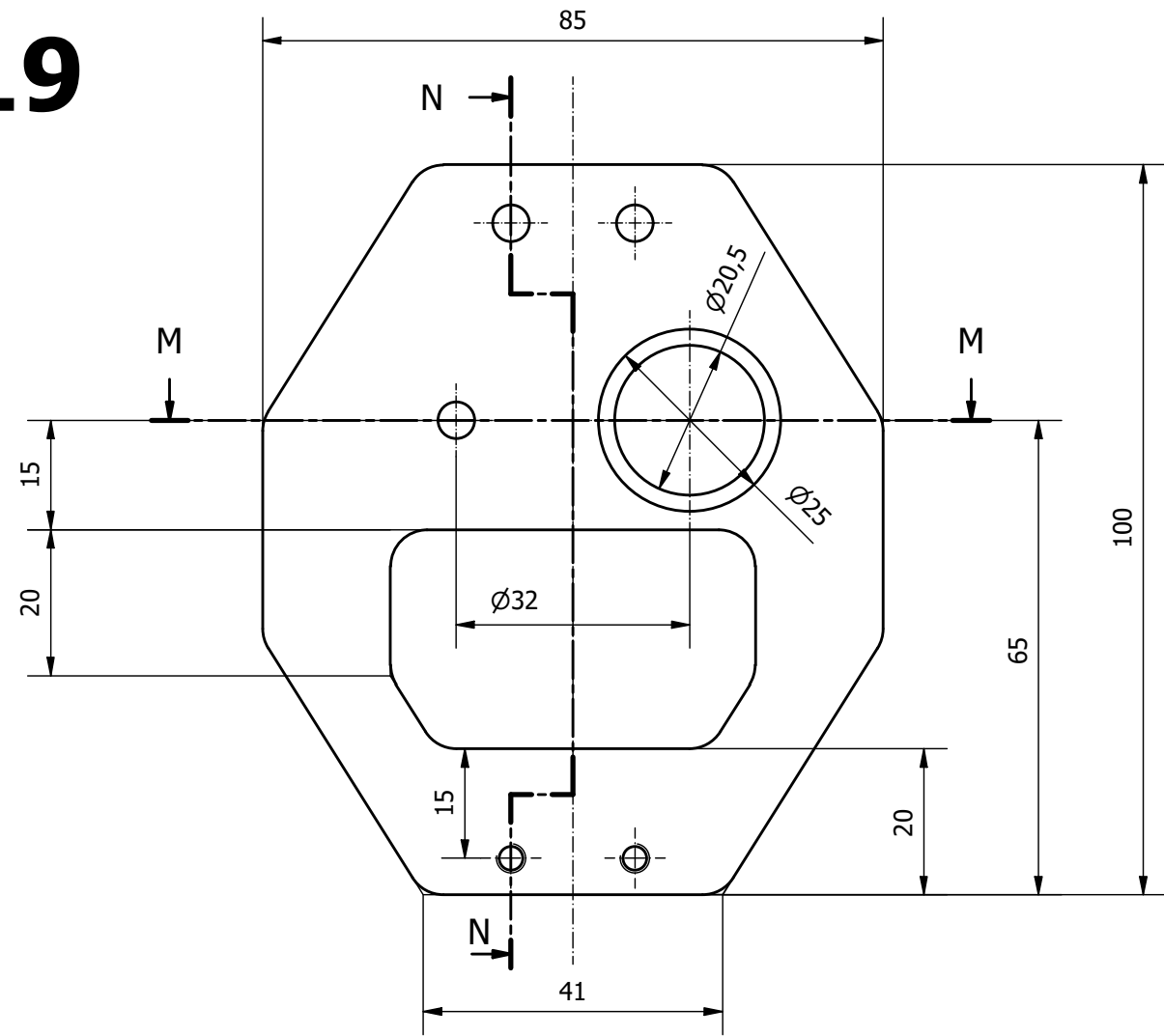
18



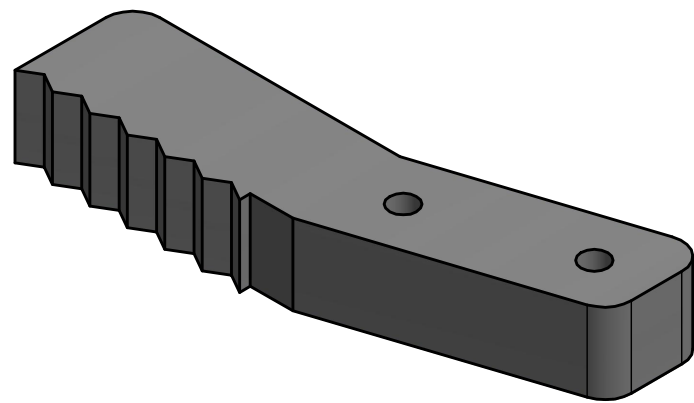
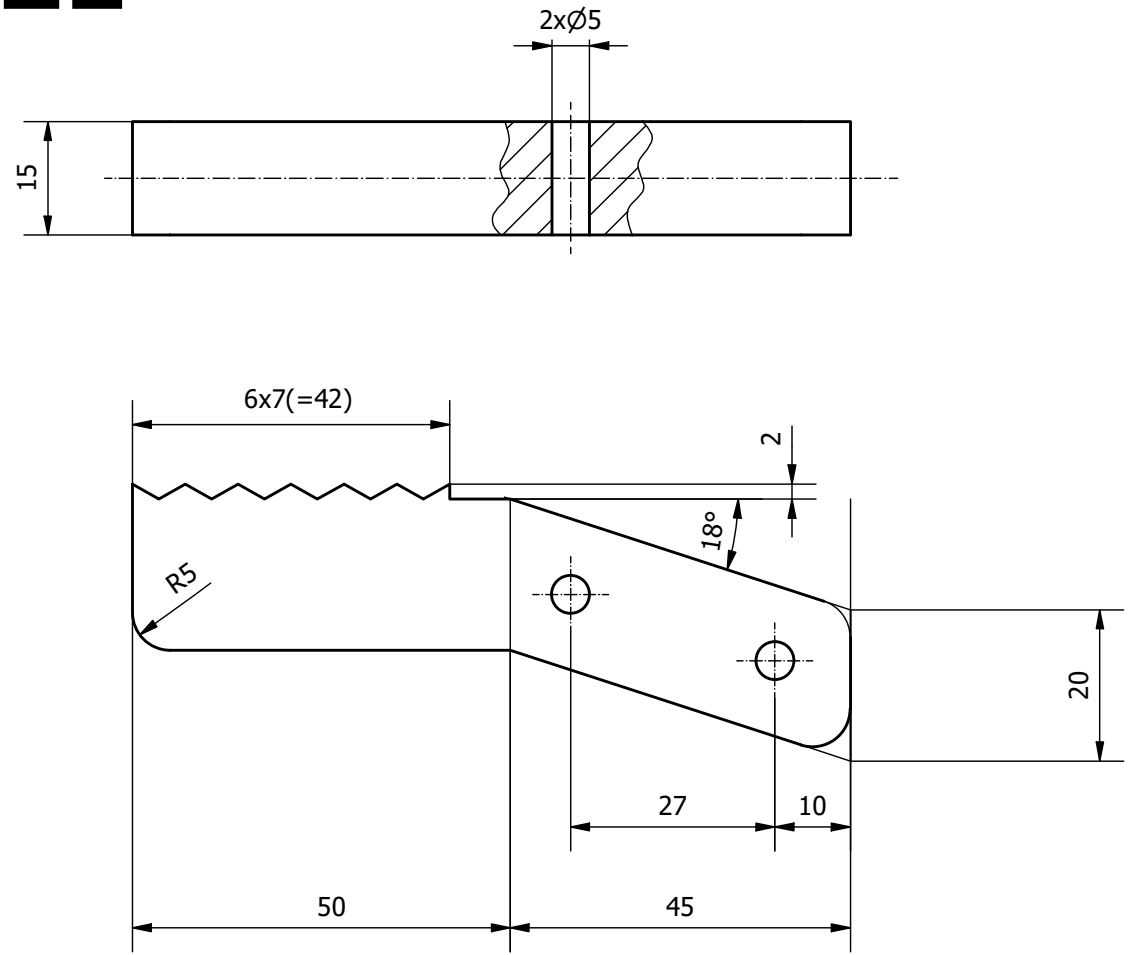
20



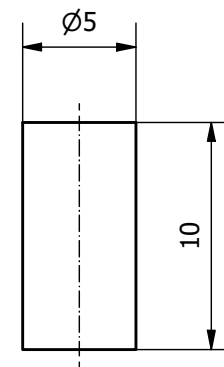
19



21

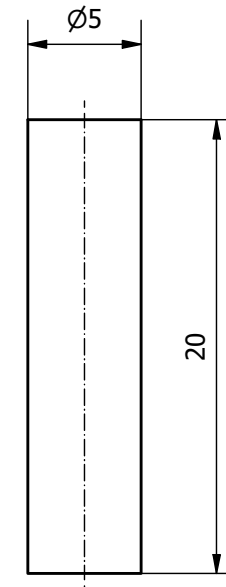


24



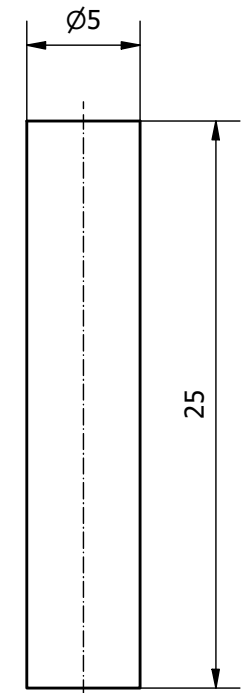
(3 : 1)

25



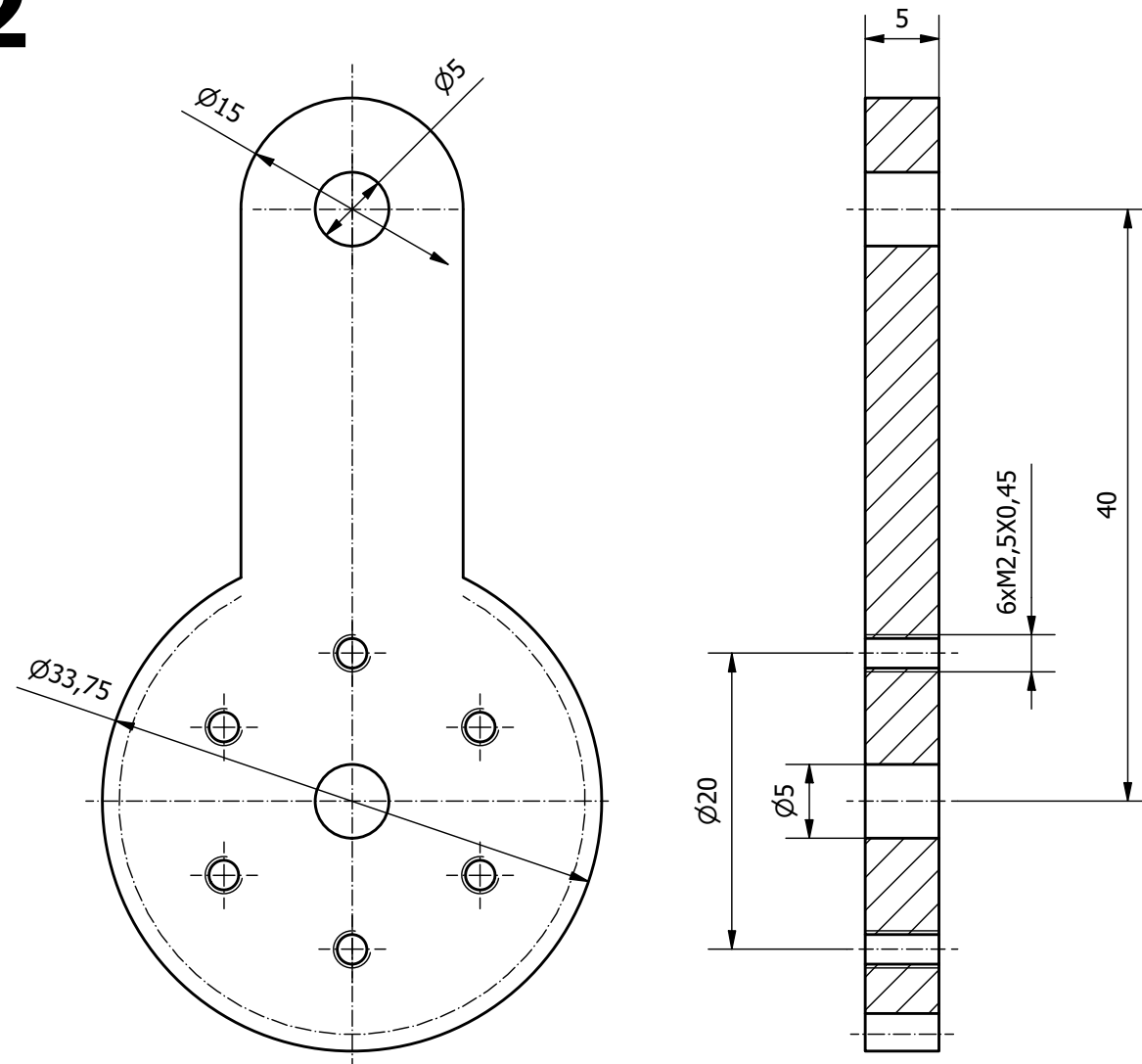
(3 : 1)

26

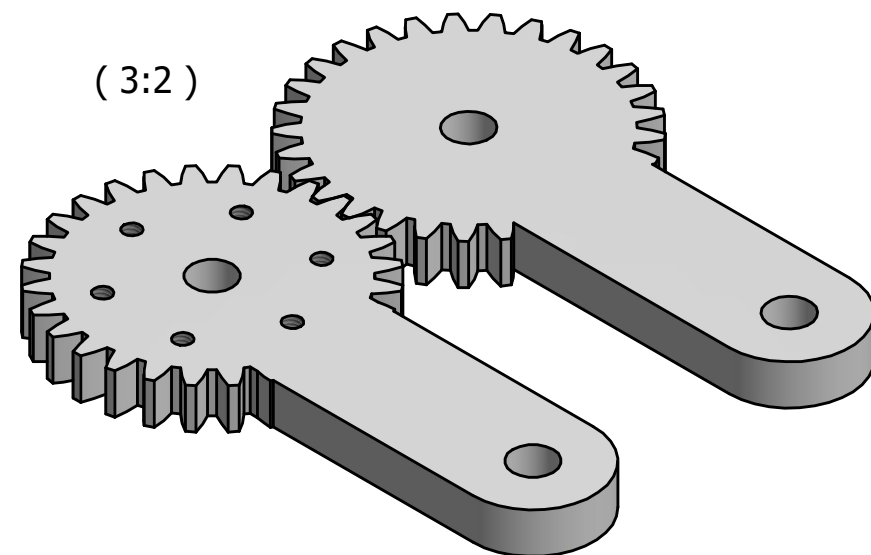
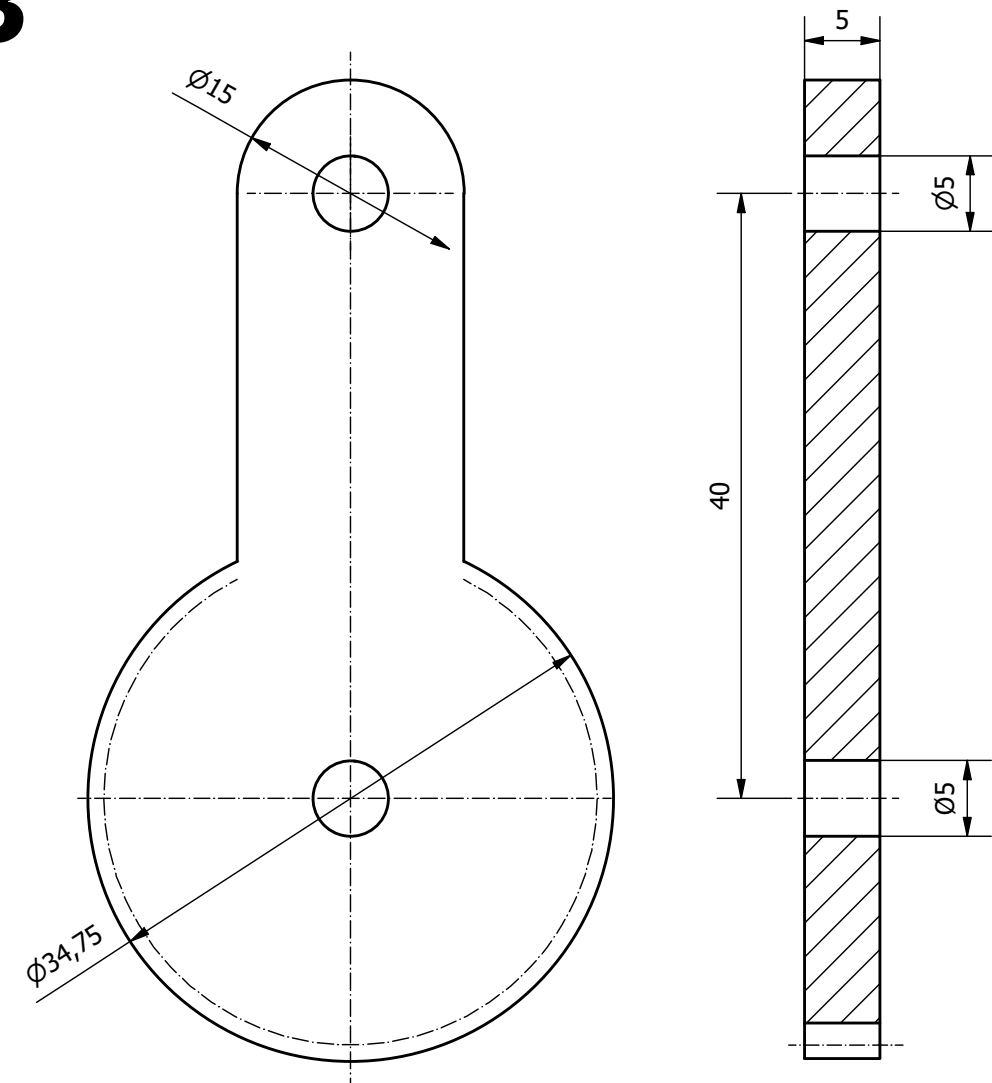


(3 : 1)

22



23



DATOS DE LA RUEDA		
Módulo	m	1,125
Nº de dientes	Z1	28
Cremallera tipo		UNE 18016
Diámetro primitivo	dp	31,5
Medida de 6 dientes	K	18,75
Distancia entre ejes	C	32
Rueda conjugada	Z2	29
	Nº de Plano	9