



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ROBOT SCARA MULTIPROPÓSITO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

ANDRÉS IGNACIO ASTUDILLO OLIVARES

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE
MATÍAS MATTAMALA ARAVENA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Beauchef Proyecta

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: ANDRÉS IGNACIO ASTUDILLO OLIVARES
FECHA: JULIO 2020
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ROBOT SCARA MULTIPROPÓSITO

Este proyecto busca el desarrollo de un robot SCARA industrial *Open Source*, relativamente accesible en términos de costo y de libre acceso en cuanto a documentos como lista de materiales, planos de fabricación e instrucciones de armado. El trabajo contempla la participación del DIMEC y del DIE en modalidad multidisciplinaria, con el apoyo de Beauchef Projecta.

Esta memoria aborda la primera parte del proyecto en términos mecánicos, desde la concepción del prototipo hasta su construcción. Incluye en primer lugar antecedentes de proyectos similares y conceptos involucrados en el diseño mecánico del brazo. Luego se exponen justificaciones sobre la selección de componentes y aspectos generales respecto a la construcción del robot.

Los SCARA industriales son ampliamente utilizados en procesos productivos, en labores de toma y posicionamiento con alta repetibilidad y velocidad. Su configuración de 4 grados de libertad, alta rigidez en el plano horizontal y reducida superficie requerida en el *layout* de la planta, les permiten ser utilizados cómodamente junto a cintas transportadoras, mesas de trabajo y otros robots.

La culminación del trabajo con el prototipo armado, permitió el cumplimiento de los objetivos generales y específicos de este trabajo. El brazo tiene capacidad de carga nominal de 3 [kg], un alcance de 668 [mm] con 200 [mm] de recorrido en Z y repetibilidad en el plano horizontal esperada de aproximadamente 20 [μm].

El prototipo de robot industrial de este trabajo se puede construir localmente, con un presupuesto en torno a CLP \$1.700.000 en materiales, en un tiempo de construcción menor a 4 meses, contando previamente con el diseño. La modularidad del diseño permite la eventual modificación de componentes de potencia y transmisión de acuerdo a los requerimientos de velocidad, repetibilidad y uso reverso.

La calidad de prototipo funcional, permite que esta unidad pueda ser utilizada con fines académicos, a su vez, sugiere modificaciones, mejoras y posibles iteraciones posteriores.

A los hacedores.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Alcances	4
2. Metodología	5
2.1. Definición de requerimientos de diseño	6
2.2. Diseño iterativo	6
2.3. Selección de componentes y materiales	6
2.4. Adquisición y fabricación de componentes	7
2.5. Construcción	7
2.6. Pruebas	8
3. Antecedentes	9
3.1. Robótica industrial	10
3.1.1. Clasificación	10
3.1.2. Pataformas con documentación abierta	11
3.2. SCARA	12
3.2.1. Ejemplos industriales	13
3.2.2. Ejemplos académicos	14
3.2.3. Justificación de la selección de un manipulador tipo SCARA	14
3.2.4. Cinemática	14
3.2.5. Dinámica	17
3.3. Conceptos de diseño mecánico	18
3.3.1. Tolerancias dimensionales	18
3.3.2. Repetibilidad, precisión y resolución	21
4. Ingeniería Conceptual	24
4.1. Parámetros de diseño	25
4.2. Configuración SCARA	27
4.2.1. Materiales eslabones	27
4.2.2. Motores	28
4.2.3. Transmisiones hombro y codo	30
4.2.4. Transmisiones Z y A	33

4.2.5.	Rodamientos hombro	34
4.2.6.	Rodamiento codo	35
4.2.7.	Acople entre ejes de transmisión y eslabones	35
5.	Metodología de cálculo	36
5.1.	Torque requerido en articulaciones rotatorias	37
5.2.	Torque requerido en actuador de articulación prismática	38
5.3.	Tornillo de bolas	39
5.3.1.	Vida	39
5.3.2.	Carga máxima permisible	39
5.3.3.	Velocidad máxima permisible	40
5.4.	Rodamientos	40
5.4.1.	Hombro	40
5.4.2.	Codo	41
5.5.	Estimación de repetibilidad	42
6.	Resultados de diseño	43
6.1.	Diseño preliminar	44
6.2.	Diseño final	46
6.2.1.	Simulación dinámica	48
6.2.2.	Componentes seleccionados	51
6.3.	Análisis de elemento finito	57
6.3.1.	Conjuntos motrices	58
6.3.2.	Eslabón húmero	60
6.3.3.	Eslabón Z	62
6.4.	Generación de URDF	65
7.	Construcción	67
7.1.	Piezas externalizadas	68
7.2.	Base	69
7.3.	Eslabón húmero	71
7.4.	Eslabón radio-cúbito	73
7.5.	Conjuntos motrices	75
7.6.	Estado actual	76
7.7.	Costo	78
7.8.	Rediseños sugeridos	78
8.	Conclusiones	81
8.1.	Según objetivos	81
8.1.1.	Requerimientos de diseño	81
8.1.2.	Diseño para la manufactura y confiabilidad	81
8.1.3.	Selección de componentes y personalización	82
8.1.4.	Construcción y pruebas	83
8.2.	Generales	83
	Bibliografía	87
	Anexos	90

A. Planos	92
B. Extractos de catálogos	106

Índice de Tablas

3.1. Características de algunos robot SCARA comerciales.	13
3.2. Parámetros de DH según coordenadas de figura 3.6.	15
3.3. Tolerancias y ajustes. Adaptado de [1].	20
4.1. Resumen parámetros de diseño.	26
4.2. Materiales disponibles localmente. Fuente datos: www.matweb.com	28
4.3. Algunos motores BLDC compatibles con ODrive.	30
4.4. Comparación entre reductora planetaria y Harmonic Drive para el mismo torque nominal de 50 [Nm].	32
5.1. Factores dinámicos radial y axial de rodamiento de rodillos cruzados.	42
6.1. Motores seleccionados para hombro, codo y Z.	51
6.2. Valores de catálogo y vida estimada de rodamientos con confiabilidad de 90%.	54
6.3. Caracterización rodamiento THK RU66 del codo.	55
6.4. Características tornillo de bolas SFE1616 seleccionado.	56
6.5. Propiedades físicas eslabones.	66
7.1. Costos componentes principales.	78

Índice de Ilustraciones

1.1. Robots industriales instalados por región según <i>World Robotics 2019</i>	2
1.2. Robots industriales instalados por industria según <i>World Robotics 2019</i>	3
2.1. Esquema de metodología en seis etapas.	5
3.1. Tipos de robots industriales [2].	10
3.2. Algunos ejemplos de máquinas <i>Open Source</i> u <i>Open Hardware</i>	12
3.3. Primer robot SCARA comercial Fujitsu “FAROT-4SB” [3].	12
3.4. Algunos robot SCARA comerciales [4], [5], [6], [7].	13
3.5. Ejemplos de robots diseñados y construidos en universidades [8], [9].	14
3.6. Sistemas de coordenadas en articulaciones de robot SCARA, adaptado de [9].	15
3.7. Esquema simplificado vista en planta configuración SCARA.	16
3.8. Esquema definición tolerancias. Fuente: UNE-EN ISO 286-1.	19
3.9. Posición tolerancias. Fuente: UNE-EN ISO 286-1.	19
3.10. Indicación de tolerancias en dibujos técnicos. Fuente: UNE-EN ISO 286-1.	20
3.11. Representación gráfica de repetibilidad de posición unidireccional según ISO9283:1998 [10].	21
3.12. Representación gráfica de precisión de posición unidireccional según ISO9283:1998 [10].	22
4.1. Objetos a manipular.	25
4.2. Servomotores y motor Stepper. Fuente: teknic.com y cimech3d.cl.	29
4.3. Placa ODrive para control de motores BLDC. Fuente: odriverobotics.com	29
4.4. Esquema reductor planetario de una etapa. Modificado de [11].	31
4.5. Reductora Harmonic Drive. Fuentes: a) Harmonic Drive AG b) Catálogo CSG-CSF Gear Units.	32
4.6. Tornillo de bolas y ranura. Fuente: Catálogo TBI motion.	33
4.7. V-slot con tornillo para desplazamiento vertical. Fuente: Open Builds.	34
4.8. Articulación hombro FUM SCARA [12].	34
4.9. Rodamiento de rodillos cruzados.	35
5.1. Diagrama de cuerpo libre representando subida (izquierda) y bajada (derecha) de carga. [13].	38
5.2. Esquema simplificación de estados para estimación de <i>backlash</i> según [14].	42
6.1. Modelo de sólidos simplificado para primeras estimaciones.	44
6.2. Trayectorias de hombro y codo en modelo simplificado.	45

6.3.	Primera iteración de diseño realizada en Solidworks (software CAD).	46
6.4.	<i>Renders</i> SCARA con y sin carcasa realizados en Inventor (software CAD).	47
6.5.	Subensambles SCARA. (1) Base. (2) Conjunto motriz hombro. (3) Eslabón húmero. (4) Conjunto motriz codo. (5) Eslabón radio-cúbito. (6) Eslabón Z.	47
6.6.	Diseño final en simulación dinámica.	48
6.7.	Trayectorias de hombro y codo.	49
6.8.	Torques requeridos en hombro y codo.	50
6.9.	Velocidad en el efector.	51
6.10.	Motores seleccionados. De izquierda a derecha: Hombro, codo, Z.	52
6.11.	Motor stepper Nema 17 de 45 [N·cm]. Fuente: Cimech.cl.	52
6.12.	Encoder AS5047P. Fuente: ams.com.	53
6.13.	Reductora planetaria seleccionada PLM060.	53
6.14.	Vista lateral en corte de eslabón húmero.	54
6.15.	Rodamiento de rodillos cruzados THK RU66.	55
6.16.	Tornillo de bolas SFE1616 instalado.	56
6.17.	Acoples marca Chaoyue modelo Z14.	57
6.18.	Cargas y restricciones en conjunto motriz hombro.	58
6.19.	Resultados análisis estático conjunto motriz hombro.	59
6.20.	Resultados análisis estático eje.	60
6.21.	Cargas y restricciones en eslabón húmero.	61
6.22.	Resultados análisis estático eje.	61
6.23.	Tensión de Von Mises en parte inferior del eslabón húmero.	62
6.24.	Resultados análisis estático eslabón Z en altura mínima.	63
6.25.	Resultados análisis estático eslabón Z en altura máxima.	64
6.26.	Vistas de referencia URDF.	65
6.27.	Puntos de referencia para posición centros de masa.	66
7.1.	Piezas externalizadas.	68
7.2.	Subensamble base.	69
7.3.	Proceso fabricación base.	70
7.4.	Eslabón húmero temrinado.	71
7.5.	Proceso fabricación eslabón húmero.	72
7.6.	Perfiles V-slot y <i>hardware</i> para construcción de eslabón radio-cúbito.	73
7.7.	Piezas de aluminio AA1100H14 cortadas con laser para armar eslabón radio-cúbito y conjuntos motrices.	74
7.8.	Conjuntos motrices del codo y el hombro ensamblados.	75
7.9.	Ensamble en etapa de cableado.	76
7.10.	Vistas ensamble con carcasa impresa en PLA.	77
7.11.	Estado actual del manipulador SCARA.	77
8.1.	Despiece articulación A rediseñada.	85
B.1.	Especificaciones reductoras planetarias PLM (China).	107
B.2.	Especificaciones reductoras planetarias PLM (China) (continuación).	108
B.3.	Especificaciones tornillo de bolas SFE (China).	109
B.4.	Especificaciones reductoras planetarias serie AE de APEX Dynamics [15].	110
B.5.	Backlash en Harmonic Drive serie CSF - CSG.	110
B.6.	Especificaciones catálogo acoples sin chaveta marca Chaoyue modelo Z14.	111

Capítulo 1

Introducción

En la última década se ha planteado con fuerza la llegada de la cuarta revolución industrial (o industria 4.0 como se le llamó en Alemania desde el 2011 [16]), donde la robótica industrial es uno de los pilares fundamentales. Junto con otras tecnologías, se busca la automatización de procesos productivos, integrando sistemas digitales con sistemas ciberfísicos.

Esto tiene el potencial de generar importantes cambios sociales asociados la fuerza laboral, los cuales requieren especial atención de los actores involucrados en la implementación de tecnologías de automatización, quienes deben considerar la transferencia de conocimiento respecto al funcionamiento, operación y mantenimiento de estas máquinas “inteligentes”.

Los SCARA son robots industriales muy populares, capaces de trabajar a alta velocidad en líneas de producción, ya sea posicionando componentes, ensamblando u operando distintos tipos de herramientas. Son robots de tamaño mediano y se han empleado bastante en la producción de componentes electrónicos.

Sin embargo, en la actualidad los robots industriales ya no son exclusivos de las grandes empresas manufactureras. La masificación del *Hardware* libre u *Open Source*, ha permitido democratizar la manufactura avanzada y la fabricación digital, permitiendo que aficionados e ingenieros compartan proyectos de manera colaborativa, facilitando el acceso al conocimiento y la tecnología.

En ese contexto han surgido en Chile emprendimientos que proponen soluciones tecnológicas desarrolladas localmente, sin embargo, cuando estas implican un producto físico, generalmente se externaliza su manufactura fuera del país. Este proyecto apunta a la capacidad técnica de estas pequeñas empresas, en especial las que requieren y tienen la oportunidad de invertir en robótica industrial abierta de bajo costo, ayudando a su vez a impulsar la manufactura local desde la colaboración.

1.1. Motivación

El cambio tecnológico que implica la cuarta revolución industrial presenta una oportunidad para pequeñas y grandes empresas en Chile, ya que puede alinearse con la necesidad de implementar procesos que den valor agregado a nuestros recursos naturales, en vez de sólo extraerlos y exportarlos directamente.

Según un estudio realizado por *PMG Business improvement* (consultora chilena de negocios especializada en mercados industriales y de servicios) y la Cámara de Comercio de Santiago, respecto al índice de transformación digital de las empresas [17], Chile se encuentra en un nivel intermedio digital (con 43 puntos de 100, 6 puntos más que el 2018, donde se consideraba en el nivel de principiante digital). Se entiende la transformación digital como el proceso por el cual las organizaciones o empresas reorganizan sus métodos de trabajo y estrategias, para obtener más beneficios gracias a la digitalización de procesos y a la implementación dinámica de las nuevas tecnologías. Si bien las grandes empresas muestran mayor digitalización de procesos, tecnología y manejo de datos, son las pequeñas empresas las que representan una mayor cultura digital, es decir, una mayor capacidad adaptativa, factor importante para avanzar a la transformación digital e implementación de tecnologías en el estado del arte.

Según la IFR (*International Federation of Robotics*) y las estadísticas de *World Robotics 2019* [18], hasta el 2018 existían 2.439.543 robots industriales operacionales en el mundo, concentrándose la mayoría (30 %) en la industria automotriz, siendo Asia el mayor mercado, como se aprecia en la figura 1.1. Las proyecciones de ventas a nivel mundial apuntan a un +12% anual promedio entre 2020 y 2022.

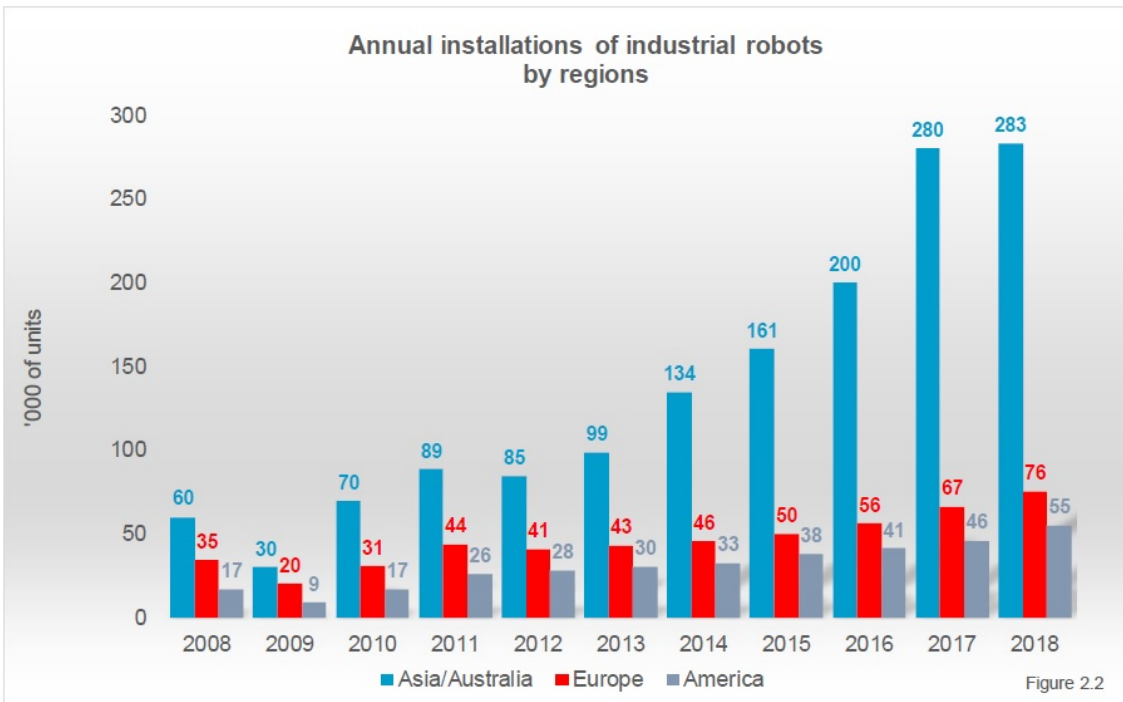


Figura 1.1: Robots industriales instalados por región según *World Robotics 2019*.

La figura 1.2 muestra la cantidad de robots industriales instalados por rubro hasta el 2018, se nota que un 19% de los robots instalados corresponden a sectores industriales no especificados, esto es un 5% más que el 2017, indicando el aumento del uso de robots industriales fuera de la industria automotriz, electrónica, metalmecánica, plásticos y alimentos.

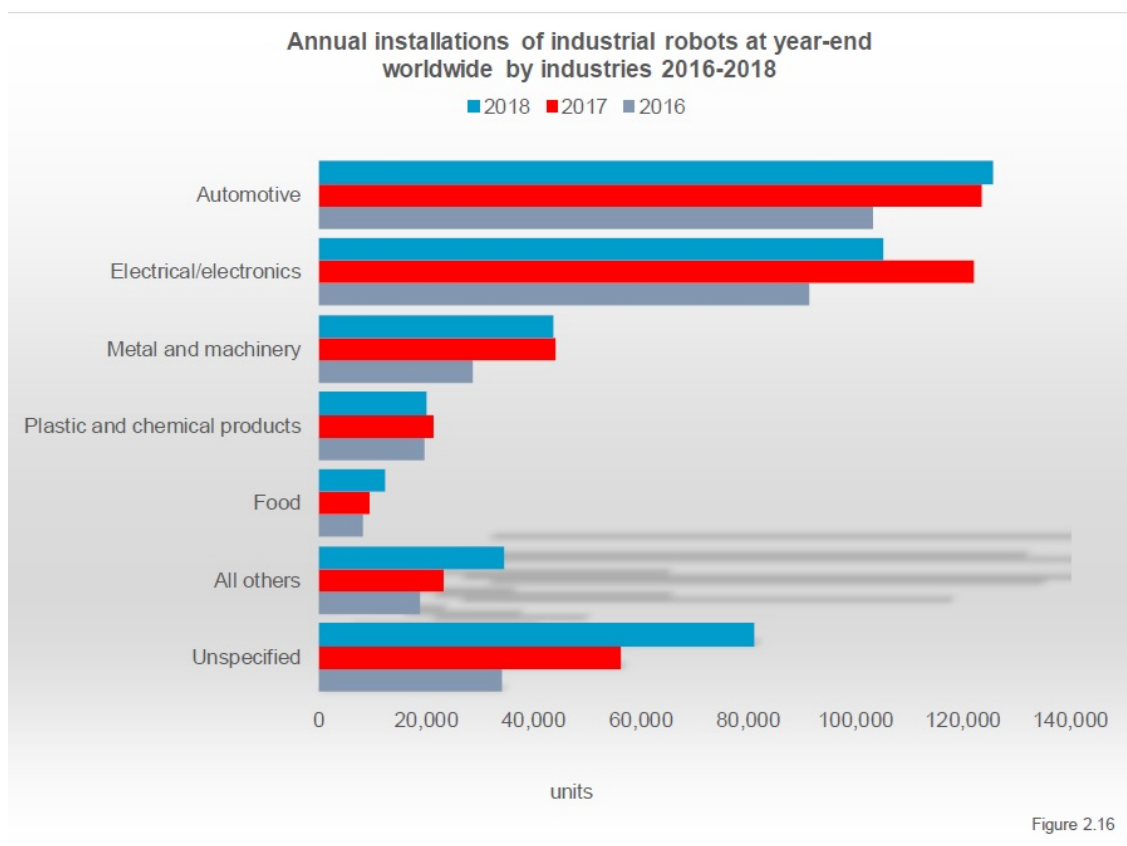


Figura 1.2: Robots industriales instalados por industria según *World Robotics 2019*.

Es necesaria la formación de profesionales con conocimientos de robótica industrial a nivel local, ya que es común que en casos implementados se requiera traer profesionales extranjeros para el mantenimiento o solución de problemas específicos, lo que se presenta como barrera al momento de implementar este tipo de tecnologías. En Chile se registran a la fecha 22 empresas de robótica industrial, 8 de robótica educativa, 7 programas educativos orientados a robótica y 7 organizaciones relacionadas con robótica, según el catastro de empresas y organizaciones dedicadas a la robótica en Chile [19] realizado por la comunidad de robótica de la Universidad de Chile.

Se requieren plataformas accesibles para las universidades. El desarrollo de manipuladores industriales de bajo costo dentro de estas se alinea con las necesidades educativas de robótica industrial, generando oportunidades para conocer más allá de su funcionamiento y programación, incluyendo conceptos asociados a su manufactura y mantenimiento.

Adicionalmente, la humanidad esta enfrentando diversos desafíos ambientales y sociales que requieren soluciones novedosas para reducir el consumo y desechos, fomentando el reciclaje, tratamiento de residuos, eficiencia de procesos y producción distribuida. En estos ámbitos la robotica tiene importantes oportunidades de desarrollo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un prototipo de brazo robótico SCARA multipropósito.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar requerimientos de diseño.
- Diseñar el SCARA con CAD & CAE.
- Evaluar y seleccionar componentes de transmisión de potencia y materiales.
- Validar el diseño mediante la construcción del robot.

1.3. Alcances

El robot desarrollado corresponde a un brazo robótico tipo SCARA, que posee ciertas ventajas de diseño y control respecto a otras alternativas. Los detalles se especifican en el capítulo 3: Antecedentes.

Este trabajo se centra en el diseño mecánico del brazo robótico utilizando CAD, CAE y CAM a nivel usuario, sin considerar análisis de fatiga ni vibraciones. No se incluye el diseño mecánico de un efector final capaz de manipular objetos, tampoco el estudio e implementación de estrategias de control, ni modelamiento de la planta. El control y la implementación de *hardware* electrónico fue abordado por Felipe Guajardo, memorista de ingeniería eléctrica, el cual participó de este trabajo de carácter multidisciplinario.

Los costos considerados en el proyecto incluyen materiales, servicios de corte laser y plasma, dejando fuera los costos asociados a mecanizado. Se buscó la simplicidad y la utilización de materiales disponibles localmente, sin embargo, fue necesario importar parte de los componentes desde China y Estados Unidos.

Tanto las pruebas de repetibilidad y precisión, como la generación de documentación adecuada para la replicabilidad del proyecto, se consideran trabajo futuro a corto plazo y no se incluyen en esta memoria.

Los materiales utilizados se especifican en los capítulos 6 y 7, no así en los planos en Anexos, los cuales sólo se adjuntan como referencias dimensionales.

Las ilustraciones y tablas de este documento, de no indicarse lo contrario, son de elaboración propia.

Capítulo 2

Metodología

En primer lugar, se presenta la metodología utilizada en este proyecto, que sintetiza los pasos y decisiones realizados para desarrollar el proyecto, que contempla la definición de requerimientos, diseño iterativo, selección de componentes, fabricación, armado y pruebas. Esto se muestra en la Figura 2.1. El diseño de un prototipo funcional en poco tiempo implica la toma temprana de decisiones con alta probabilidad de falla. Es por eso que se debe contar con claridad respecto a hitos de diseño y manufactura de manera concurrente.

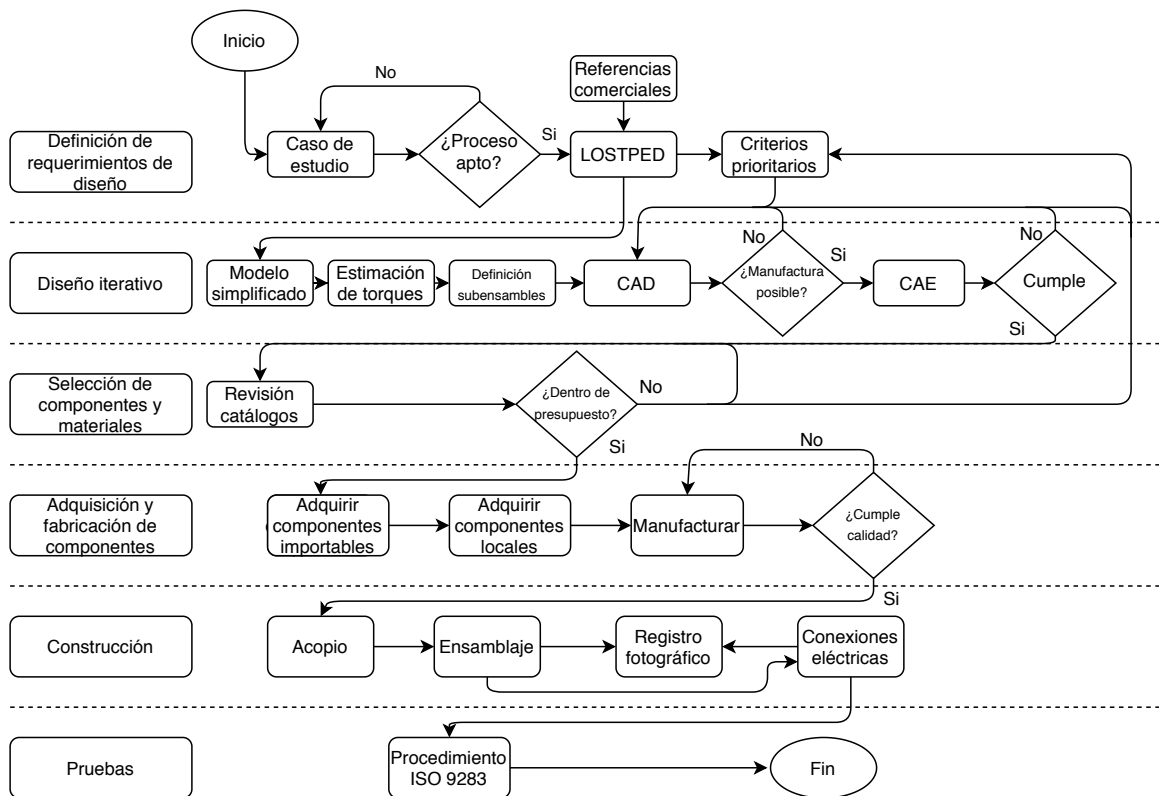


Figura 2.1: Esquema de metodología en seis etapas.

2.1. Definición de requerimientos de diseño

Como referencia, se considera un caso de estudio asociado a un proceso productivo de pequeña escala. Con necesidades concretas de dimensiones de trabajo y carga, se analiza las especificaciones de SCARA disponibles en el mercado actualmente para analizar características asociadas a los componentes de potencia, transmisión y materiales.

Como guía referencial para ordenar los parámetros de diseño se responden las preguntas LOSTPED (*Load, Orientation, Speed, Travel, Precision, Environment, Duty cycle*) [20] para selección de actuadores lineales. Finalmente se debe ajustar el monto total de costo de los componentes que cumplen los requerimientos de diseño al presupuesto del proyecto, iterando en la búsqueda del cumplimiento de ambas restricciones.

2.2. Diseño iterativo

El trabajo de diseño comienza por generar un modelo simplificado, considerando un mecanismo de dos grados de libertad para estimar torques requeridos en las articulaciones del hombro y codo.

Se le da prioridad a ciertos criterios para guiar la toma de decisiones. Luego se definen los subensambles del robot. Según lo anterior y los materiales disponibles localmente, se realiza un diseño preliminar en CAD, el cual se va mejorando concurrentemente en función de la manufactura (recursos y tiempos disponibles, se entiende que las piezas deben requerir de la menor cantidad de trabajo posible), además de cumplir con los criterios prioritarios seleccionados.

Se realizan simulaciones dinámicas en escenarios de operación con distinta exigencia, obteniendo fuerzas y momentos que actúan sobre las articulaciones durante toda la trayectoria. Se registran valores máximos para analizar mediante elemento finito el desempeño de los eslabones diseñados, también para calcular y seleccionar componentes comerciales.

2.3. Selección de componentes y materiales

Esta etapa se lleva a cabo luego de las primeras acciones de la etapa anterior, en paralelo a nuevas iteraciones de diseño.

Con la estimación de potencia de motores y relación de transmisión obtenidos en los primeros pasos de la etapa anterior, se consulta catálogos y cotizan estos componentes, dando prioridad a los que requieren importación.

Para los materiales de los eslabones el criterio más relevante es la disponibilidad local y facilidad de manufactura. Además de cumplir con la resistencia suficiente para soportar holgadamente las cargas de operación, a un costo razonable.

Se realizan cálculos para la selección de rodamientos y tornillos de transmisión lineal. Para esto se toma como guía el libro *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, novena edición [13]. Se definen las cargas estáticas, cargas dinámicas y vida de los componentes. Paralelamente se consulta catálogos de SKF, THK, HIWIN y TBI motion para la selección de rodamientos y actuadores lineales.

La suma de las cotizaciones debe estar dentro del presupuesto del proyecto, de lo contrario se debe escoger componentes de menor costo y en último caso volver a redefinir los criterios de diseño, repitiendo todo el proceso realizado hasta este punto. El *output* de esta etapa es la lista de materiales (BOM) definitiva del proyecto.

2.4. Adquisición y fabricación de componentes

De la lista de materiales se debe diferenciar qué es adquirido y qué es fabricado. Los componentes que deban adquirirse se separan en los que deben importarse y los que se deben comprar localmente. Las compras deben agruparse de manera que se realicen la menor cantidad de transacciones.

Los componentes que deben ser fabricados se trabajan principalmente en el taller mecánico de la Universidad de Chile (taller de Molina) y el Fablab, utilizando los planos de fabricación preliminares (esto implica que pueden no contar con detalles del proyecto en el cajetín y estar sujetos a cambios). Contando con los materiales, se reservan tiempos de torno, fresa, CNC según lo requerido.

2.5. Construcción

La construcción o armado se lleva a cabo en el taller de Molina. En esta etapa se usa como guía el ensamble realizado en CAD. Durante el proceso se debe llevar un registro fotográfico y audiovisual para complementar el documento de instrucciones a generar posteriormente. Se registra toda eventualidad experimentada durante el proceso de construcción. Finalmente se debe armar la caja eléctrica y realizar las conexiones respectivas a todos los sensores y actuadores. El *output* de esta etapa es el robot construido.

2.6. Pruebas

Las pruebas son necesarias y se consideran prioridad en el trabajo futuro a corto plazo, considerando las mediciones sugeridas por la norma ISO 9283. sin embargo, no son documentadas en esta memoria.

Para determinar la repetibilidad se debe realizar una trayectoria de prueba 31 veces, llegando a un reloj comparador desde cada eje ortogonal. Luego se determina la variabilidad de los resultados, determinando repetibilidad y precisión.

También se debe medir las trayectorias y velocidad nominales obtenidas del diseño, de manera que se compruebe el correcto funcionamiento del ensamble y el sistema de control. Ante cualquier resultado insatisfactorio, se debe contemplar el desensamble y reensamble del robot para correcciones, y en último caso, rediseño de componentes.

El último parametro a determinar es el tiempo de ciclo sin carga y con carga de 2 [Kg]. Para esto se debe tomar el tiempo total que involucra levantar la carga 25 [mm], moverla en línea recta horizontalmente 300 [mm] y bajarla 25 [mm].

Capítulo 3

Antecedentes

En esta sección se presenta primero la definición y clasificación de robots industriales, junto a algunos proyectos de desarrollo de máquinas con enfoque industrial de relativamente bajo costo y documentación accesible. Después se especifican las características del robot industrial tipo SCARA. Luego se mencionan las tolerancias dimensionales y su importancia en el diseño para la manufactura. Finalmente se refiere a los conceptos de repetibilidad y precisión de un manipulador robótico.

3.1. Robótica industrial

En el capítulo 1 de *World Robotics Industrial Robots 2019* de la IFR [2], se presentan los robots industriales definidos según la ISO 8373:2012, como manipuladores multipropósito reprogramables, controlados automáticamente, programables en tres o más ejes, los cuales pueden estar fijos o ser móviles, para uso en aplicaciones de automatización industrial.

3.1.1. Clasificación

Según el mismo documento de *World Robotics 2019*, los robots industriales pueden ser clasificados según su estructura mecánica como:

- **Cartesianos o lineales:** Robot con tres articulaciones prismáticas, cuyos ejes se alinean con un sistema de coordenadas cartesiano.
- **SCARA:** Robot con dos articulaciones rotatorias paralelas que proveen “conformidad” (*compliance*) en el plano horizontal.
- **Articulado:** Robot cuyo brazo posee al menos tres articulaciones rotatorias, generalmente asociado con manipuladores de seis grados de libertad.
- **Paralelos o delta:** Robot cuyos brazos poseen articulaciones prismáticas o rotatorias concurrentes.
- **Cilíndricos:** Robot cuyos ejes forman un sistema de coordenadas cilíndrico.

En la figura 3.1 se muestran algunas de las estructuras mecánicas de la clasificación mencionada.

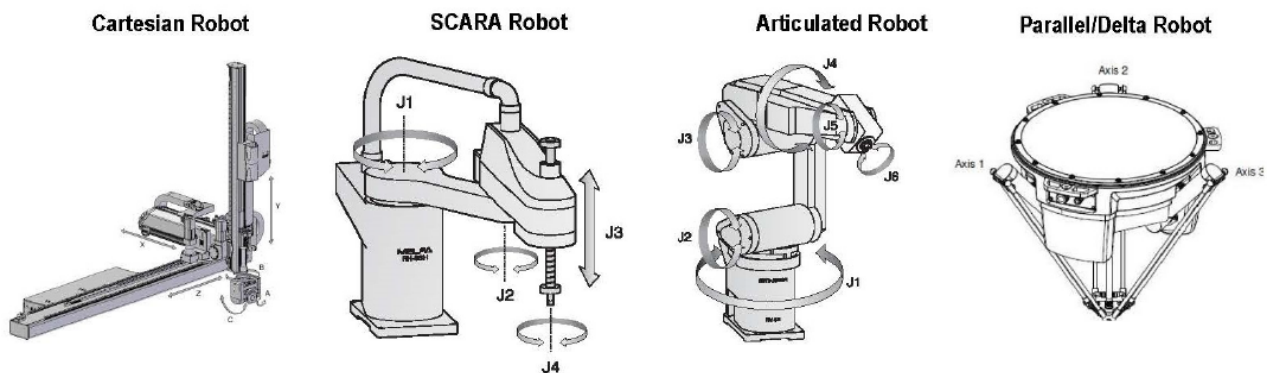


Figura 3.1: Tipos de robots industriales [2].

3.1.2. Plataformas con documentación abierta

La modalidad de liberar documentación sobre proyectos de *hardware* ha sido ampliamente implementada en el mundo. Esto ha permitido acelerar y mejorar el acceso a algunas tecnologías de fabricación digital, como la impresión 3D y el “routeado” CNC.

A continuación se mencionan algunos (de muchos) proyectos abiertos, específicamente centrados en el desarrollo de máquinas con documentación libre para su replicabilidad. Estos ejemplos se muestran en la figura 3.2.

Open builds

Open builds [21] posee una comunidad para compartir desarrollos, donde se registran a la fecha más de 1200 máquinas construidas, documentadas en distintos niveles. Los proyectos corresponden principalmente a máquinas cartesianas *router* CNC e impresoras 3D, basados en perfiles de aluminio 6063 T5 V-slot. Sin embargo, hay también desarrollos de *scanners*, manipuladores, termoformadoras y tornos CNC pequeños. Se registra también libre acceso a proyectos realizables por este tipo de máquinas, además de recursos de *software* CAM.

Annin Robotics

El AR3 de *Annin Robotics*[22] corresponde a un robot de 6 grados de libertad con motores *stepper* y transmisión por correas, con documentación abierta para que cualquier persona con los recursos suficientes pueda replicarlo. Se diseñó para ser construido en aluminio o impresión 3D, con el objetivo de ser multipropósito, abarcando funciones de entretenimiento, educativas o para producción de pequeña escala. Los archivos como manual de ensamblado y *software* para operarlo se pueden descargar gratis en su sitio. También se puede acceder a la compra de kits para poder replicarlo, los que suman un total de US\$1.328 en materiales mecánicos y eléctricos para un AR3 de aluminio.

Evezor

Evezor[23] es un SCARA *Open Source* basado en componentes mecanizados de acero e impresos en 3D, con motores *stepper* y transmisión por correas, que busca democratizar la robótica en la manufactura de pequeña escala. Es un proyecto que se encuentra en etapa de pilotaje, con pocas unidades construidas. En su sitio se encuentran libres los archivos de CAD y códigos de funcionamiento, junto con demostraciones de grabado laser, soldadura, toma y posicionamiento de circuitos integrados, manipulación de objetos, entre otras. Se puede encargar el robot por US\$3.999.



(a) Open builds.



(b) Annin robotics.



(c) Evezor.

Figura 3.2: Algunos ejemplos de máquinas *Open Source* u *Open Hardware*.

3.2. SCARA

El robot industrial tipo SCARA fue desarrollado en 1978 en Japón bajo la propuesta del profesor Hiroshi Makino en la universidad de Yamanashi [3], el resultado de este desarrollo se muestra en la figura 3.3. El acrónimo SCARA viene de *Selective Compliance Assembly Robot Arm*, es decir, brazo robótico con conformidad selectiva. El término *compliance* hace referencia a la poca rigidez horizontal que presenta esta configuración, en contraste con su alta rigidez vertical.

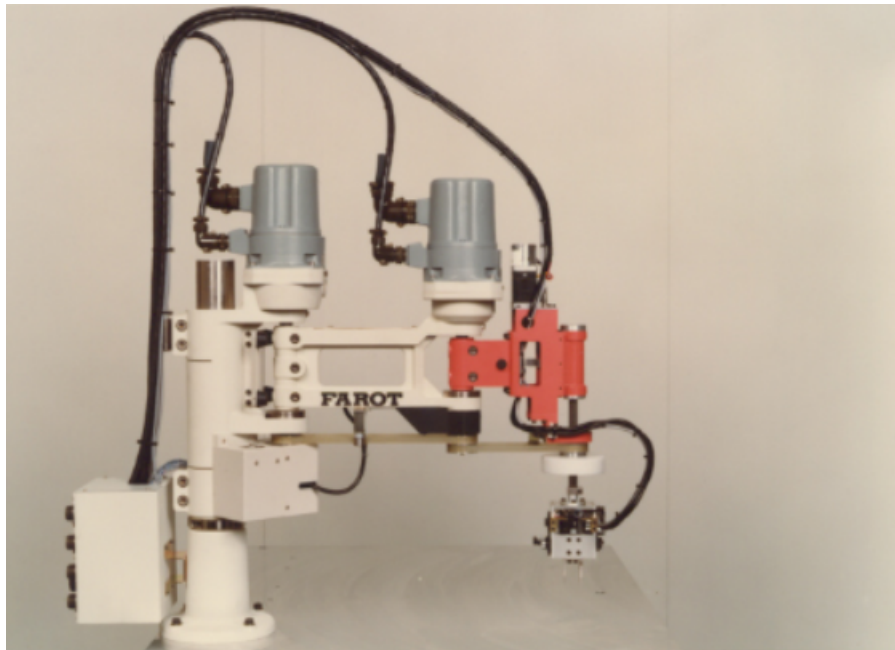


Figura 3.3: Primer robot SCARA comercial Fujitsu “FAROT-4SB” [3].

Estos robots pueden trabajar con buena precisión a alta velocidad, son utilizados ampliamente en líneas de producción, en labores de paletización, ensamblaje, soldadura de circuitos, posicionamiento de componentes electrónicos, perforación, entre otras.

3.2.1. Ejemplos industriales

Existen muchas alternativas de robot SCARA disponibles en el mercado. Sus dimensiones de trabajo van desde los 300 [mm] a los 1.200 [mm] de alcance, con recorridos del eje z entre los 150 [mm] y 400 [mm]. El costo de un robot SCARA nuevo varía aproximadamente entre los 10.000 y 15.000 USD. En la tabla 3.1 se muestran las principales características de los robots de la figura 3.4.

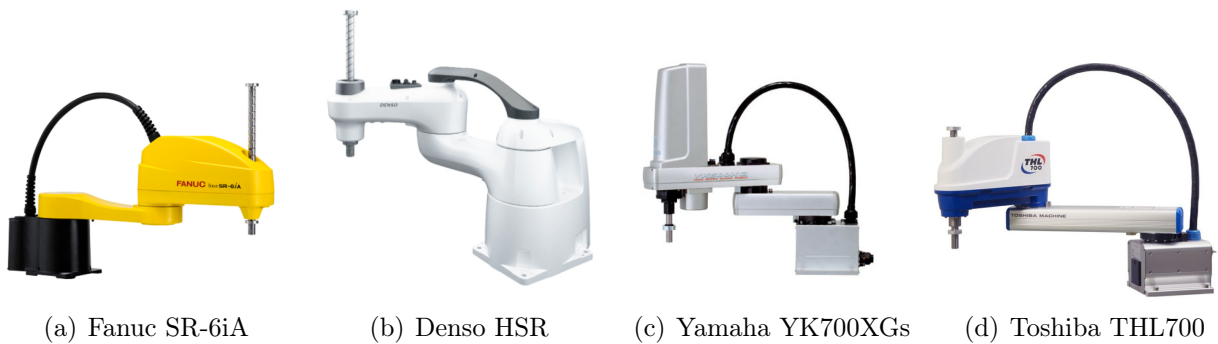


Figura 3.4: Algunos robot SCARA comerciales [4], [5], [6], [7].

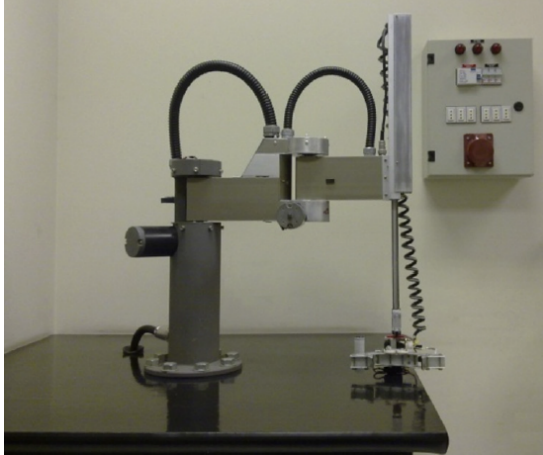
Tabla 3.1: Características de algunos robot SCARA comerciales.

Marca/Modelo	Alcance [mm]	Capacidad carga [kg]	Desplazamiento en z [mm]	Velocidad máxima angular [°/s]	Velocidad máxima lineal [mm/s]	Repetibilidad J1 J2 [mm]	Repetibilidad Z (J3) [mm]	Tiempo de ciclo con carga de 2 Kg [s]
FANUC SR-6iA	650	6	210	440 (J1) 700 (J2) 2500 (J4)	2000 (J3)	0,01	0,004	-
Denso HSR065A1-N/S	650	8	320	-	8850 (J1 J2)	0,012	0,01	-
Yamaha YK700XGs	700	20	200 ó 400	1020 (J4)	8400 (J1 J2) 2300 (J3)	0,02	0,01	0,42
Toshiba Machine THL 700	700	10	150 ó 300	450 (J1) 450 (J2) 1700 (J4)	7900 (J1 J2) 2000 (J3)	0,01	0,015	0,5

Los términos J1, J2, J3 y J4 hacen referencia a las articulaciones del “hombro”, “codo”, prismática del efector (traslación vertical) y rotacional del efector respectivamente. El tiempo de ciclo corresponde al requerido para tomar un objeto de 2 [kg], levantarlo 25 [mm], desplazarlo horizontalmente 300 [mm] y bajarlo 25 [mm] [12]. Se destaca el orden de magnitud de la repetibilidad lograda en el plano horizontal por estos manipuladores, entre 10 y 20 [μ m].

3.2.2. Ejemplos académicos

Alrededor del mundo se han realizado distintos proyectos universitarios que involucran el diseño y construcción de robots SCARA [9], [8], [24]. Este tipo de desarrollo ha permitido a los establecimientos contar con plataformas para estudiar distintas estrategias de control, también para familiarizar a los estudiantes con la funcionalidad de los robots industriales.



(a) Robot desarrollado en USACH, Chile.



(b) Robot desarrollado en Ferdowsi University of Mashhad, Irán.

Figura 3.5: Ejemplos de robots diseñados y construidos en universidades [8], [9].

3.2.3. Justificación de la selección de un manipulador tipo SCARA

La selección del tipo de robot a desarrollar, se basó en un análisis respecto a complejidad de construcción y prestaciones. Cabe destacar que el volumen de trabajo de los SCARA es superior a su área de montaje proyectada, no como el caso de los robots cartesianos o los robots delta, los que utilizan un *footprint* bastante amplio. A su vez, los SCARA poseen menor cantidad de actuadores que los robots articulados de seis grados de libertad, simplificando su modelamiento y control. Otra ventaja respecto a estos manipuladores, es que los SCARA permiten utilizar actuadores de menor torque, ya que el peso de la cadena de eslabones es soportada por rodamientos y no por los mismos actuadores, sin embargo, poseen menor flexibilidad de movimientos, por lo que la aplicación final es relevante en la selección del tipo de manipulador.

3.2.4. Cinemática

Cinemática directa

La **cinemática directa** describe la posición del efector final del robot, dada la posición de sus actuadores. Esta se puede determinar fácilmente utilizando el método de Denavit

Hartenberg [9], [24], [25], el cual permite de manera sistemática obtener las matrices de transformación desde el sistema de coordenadas de la base hasta el efector para cualquier cadena de eslabones rígidos unidos por articulaciones. Se asocia un sistema de coordenadas a la base y a cada articulación hasta llegar al efector (se debe asignar un sistema de coordenadas a este último). Los parámetros se ordenan como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros de DH según coordenadas de figura 3.6.

i	a_{i-1}	d_i	θ_i	α_{i-1}
1	0	d_1	θ_1	0
2	r_1	0	θ_2	0
3	r_2	0	θ_3	0
4	0	d_4	0	0
5	0	d_5	0	π

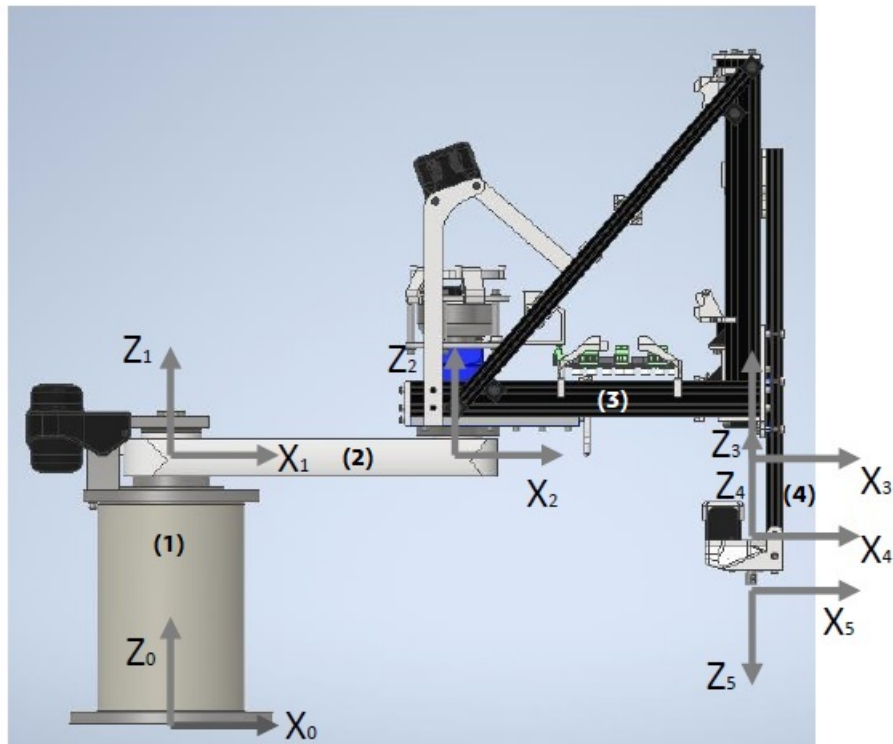


Figura 3.6: Sistemas de coordenadas en articulaciones de robot SCARA, adaptado de [9].
 (1) Base, (2) Eslabón húmero, (3) Eslabón radio-cúbito, (4) Eslabón Z.

En la figura 3.6, según la nomenclatura utilizada en este trabajo, el sistema de coordenadas de subíndice 1 corresponde a la articulación rotatoria del **hombro**, el de subíndice 2 a la articulación rotatoria del **codo**, los de subíndices 3 y 4 representan las articulaciones rotatoria del efector (articulación **A**) y prismática del eje **Z** respectivamente. Los eslabones se identifican como **base** (entre sistemas de coordenadas de subíndice 0 y 1), **húmero** (entre

los de subíndice 1 y 2), **radio-cúbito** (entre los de subíndice 2 y 3), **Z** (entre los de subíndice 3 y 5).

La distancia r_1 se refiere al largo del eslabón húmero entre articulaciones (hombro y codo) y r_2 al largo del eslabón radio-cúbito entre articulaciones (codo y centro del efector). El parámetro d corresponde a la distancia vertical entre sistemas de coordenadas. Los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 hacen referencia a la rotación del hombro, codo y A respectivamente. Se considera que P es el paso del tornillo de bolas utilizado en el actuador lineal para movimiento en Z y que θ_4 corresponde al ángulo de rotación de éste último. Con lo anterior se puede deducir la matriz de transformación (ecuación 3.1) desde el sistema de coordenadas de la base al efector.

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & r_1 \cos(\theta_1) + r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & r_1 \sin(\theta_1) + r_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & -1 & d_1 - d_5 - \frac{P}{2\pi} \theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La posición del efector dados los ángulos de las articulaciones, se sintetiza en la ecuación 3.2. La figura 3.7 muestra una vista esquemática en planta de los ángulos θ_1 y θ_2 .

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \cos(\theta_1) + r_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ r_1 \sin(\theta_1) + r_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ d_1 - d_5 - \frac{P}{2\pi} \theta_4 \\ \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

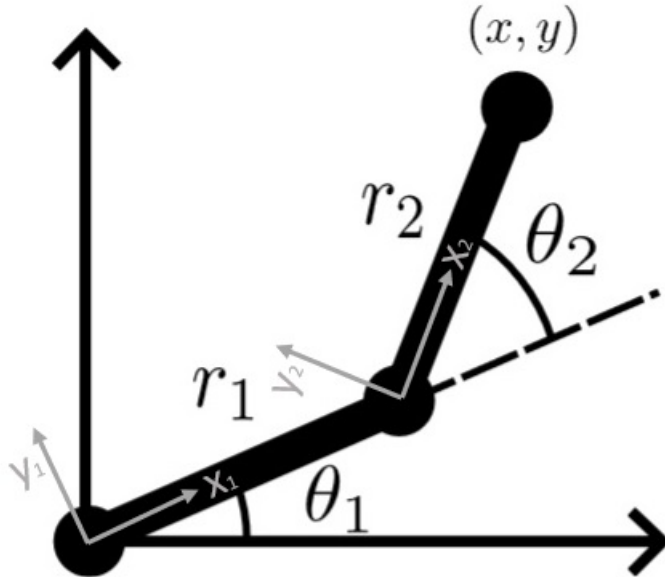


Figura 3.7: Esquema simplificado vista en planta configuración SCARA.

Cinemática inversa

La **cinemática inversa** se refiere a la deducción de las variables de posición a lo largo de la cadena de eslabones y articulaciones, dada una posición objetivo del efector final, es decir, una función que retorna los ángulos de las articulaciones.

La cinemática inversa suele ser más compleja que la cinemática directa, debido a que las ecuaciones a resolver son generalmente no lineales, pueden existir múltiples soluciones, incluso infinitas (en el caso de un manipulador cinemáticamente redundante, es decir, que posea más grados de libertad de los necesarios para ejecutar una tarea), o no existir soluciones admisibles [26].

En el caso de los SCARA este problema es relativamente simple en comparación a un robot articulado con más grados de libertad, ya que para cada posición de (x,y,z) (menor al radio máximo extendido del brazo), existen dos posibles soluciones, asociadas a las configuraciones de “brazo derecho” o “brazo izquierdo”, condición que se puede restringir según la aplicación. Como sugiere la figura 3.7, solucionando geoméricamente la cinemática inversa del robot SCARA, los ángulos θ_1 y θ_2 se obtienen de las ecuaciones 3.3 y 3.4, las cuales poseen dos combinaciones de ángulos que satisfacen la igualdad.

$$\tan(\theta_1) = \frac{-(r_2 \cdot \sin(\theta_2)) \cdot x + (r_1 + r_2 \cdot \cos(\theta_2)) \cdot y}{(r_2 \cdot \sin(\theta_2)) \cdot y + (r_1 + r_2 \cdot \cos(\theta_2)) \cdot x} \quad (3.3)$$

$$\cos(\theta_2) = \frac{(x^2 + y^2) - (r_1^2 + r_2^2)}{2 \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (3.4)$$

En general, la solución de la cinemática inversa puede realizarse mediante métodos numéricos utilizando el jacobiano, con procedimientos similares al método de Newton-Raphson o el método del gradiente [27].

3.2.5. Dinámica

La dinámica se refiere a las fuerzas y torques involucrados en el movimiento del manipulador.

Generalmente se utiliza la formulación de Euler-Lagrange para modelar la dinámica del sistema describiéndolo en base a su energía cinética y potencial [27]. El Lagrangiano se muestra en forma vectorial en la ecuación (3.5) donde T es la energía cinética y U el potencial del sistema. $M(q)$ corresponde a la matriz de masas o inercias, m_i es la masa del eslabón i , g_0 es el vector de aceleración de gravedad y p_{c_i} es la posición del centro de masa del eslabón i . L es el Lagrangiano y q es el vector de coordenadas generalizadas del sistema.

$$L(q, \dot{q}) = \underbrace{\frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q}}_T - \underbrace{\sum_{i=1}^n m_i g_0^T p_{c_i}}_U \quad (3.5)$$

En 3.6 se muestra el sistema de ecuaciones diferenciales de Euler Lagrange, el cual describe la dinámica del sistema, donde τ es el vector de torques totales generalizados, el cual corresponde a los torques aplicados por los motores en las articulaciones más momentos externos, menos el torque debido a la inercia de los motores y el torque debido a la fricción.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial L}{\partial q} \right)^T = \tau \quad (3.6)$$

Resolviendo:

$$M(q) \ddot{q} + \underbrace{\left(\dot{M}(q) - \frac{1}{2} \dot{q}^T \left(\frac{\partial M(q)}{\partial q} \right)^T \right)}_{C(q, \dot{q})} \dot{q} + \underbrace{\left(- \sum_{i=1}^n J_{\nu}^{iT}(q) m_i g_0 \right)}_{g(q)} = \tau \quad (3.7)$$

Donde $C(q, \dot{q})$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de coriolis, mientras $g(q)$ son las fuerzas gravitacionales debidas al peso de los eslabones, con $J_{\nu}^{iT} = \frac{\partial p_{c_i}}{\partial q}$ es el jacobiano de velocidad lineal del centro de masa del eslabón i .

3.3. Conceptos de diseño mecánico

3.3.1. Tolerancias dimensionales

Estas se pueden especificar según la norma ISO 286. El concepto de tolerancia hace referencia a las medidas permisibles al manufacturar un componente, específicamente determinando la diferencia entre diámetros máximos y mínimos admisibles para ejes y agujeros (asumiendo calce entre estos dos). La claridad respecto a las tolerancias es crucial para la correcta elaboración de planos de fabricación, dando guías para el control de calidad en la manufactura.

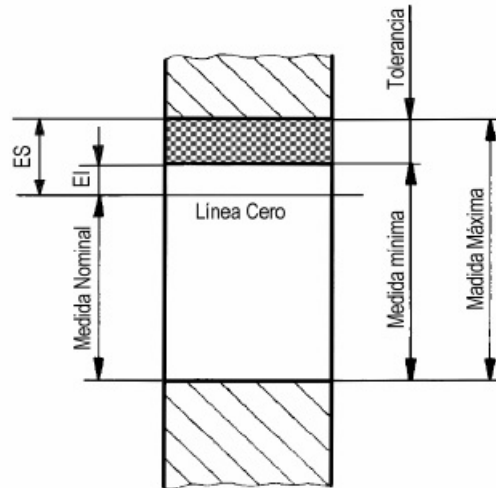


Figura 3.8: Esquema definición tolerancias. Fuente: UNE-EN ISO 286-1.

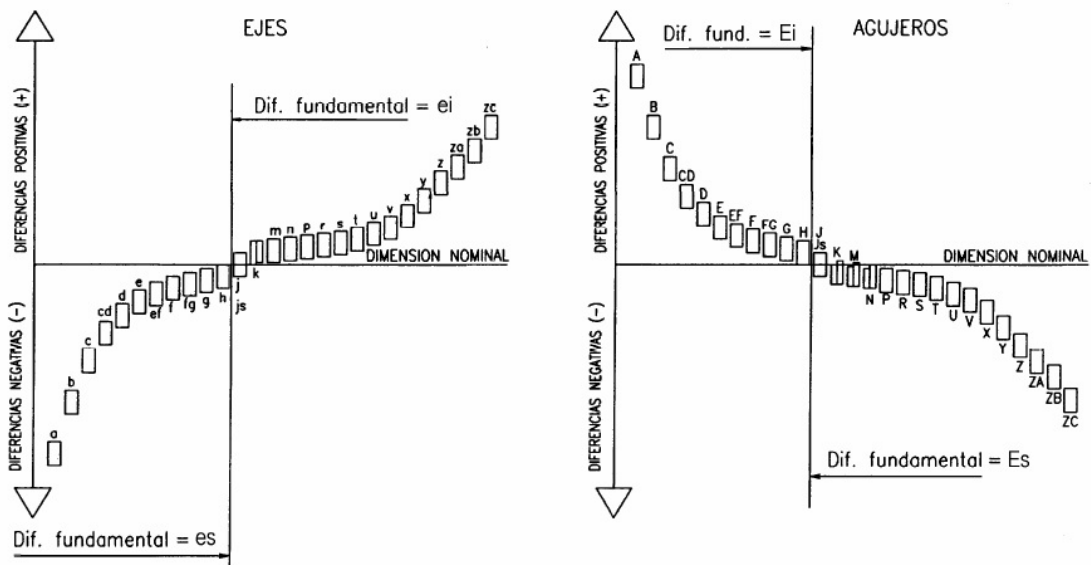


Figura 3.9: Posición tolerancias. Fuente: UNE-EN ISO 286-1.

La norma designa 20 posibles grados de tolerancia (referidos con las letras IT), los cuales se denominan con un número, el cual indica el grado de ajuste u holgura admisible en función del diámetro del componente, el valor del número no indica directamente los $[\mu m]$ de tolerancia, sino más bien es sólo un indicador para encontrar el valor con funciones y tablas. Las letras IT se omiten cuando se especifica una posición de la zona de tolerancia. Se definen 28 posiciones distintas respecto a medida nominal, denominadas con letras mayúsculas para agujeros y minúsculas para ejes.

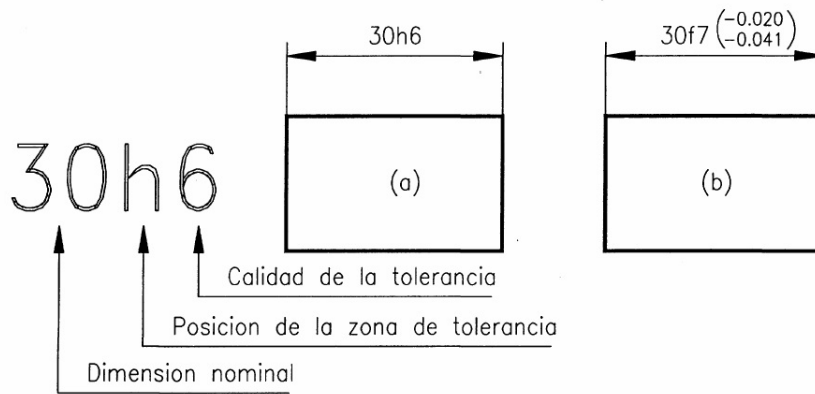


Figura 3.10: Indicación de tolerancias en dibujos técnicos. Fuente: UNE-EN ISO 286-1.

Una buena referencia para revisar conceptos relacionados con labores de mecanizado es el *Machinery's Handbook* [1], de donde se extrae la información de la tabla 3.3 respecto a rango de tolerancias según el ajuste deseado en componentes mecánicos.

Tabla 3.3: Tolerancias y ajustes. Adaptado de [1].

	Simbolo ISO		DESCRIPCION	
	Basado en agujero	Basado en eje		
Ajuste con holgura	H11/c11	C11/h11	Suelto: Ajuste para amplia holgura de miembros externos. Libre: Ajuste no apto cuando la precisión es esencial, pero bueno para grandes variaciones de temperatura, altas velocidades de funcionamiento y altas cargas de uso diario. Cercano: Ajuste apto para maquinas de precision, para velocidades y cargas de uso diario moderadas. Deslizante: No llega a tener un movimiento libre pero permite movimiento y rotación para ensamblar con precisión. Fijación con holgura: Proporciona un ajuste apretado para ubicar piezas estacionarias, pero permitiendo ensamblar y desmontar libremente.	Más Holgura
	H9/d9	D9/h9		
	H8/f7	F8/h7		
	H7/g6	G7/h6		
Ajuste de transición	H7/h6	H7/h6	Fijación de transición: Ajuste apto para fijación precisa, incierta entre holgada y con interferencia. Fijación de transición: Ajuste para fijaciones precisas donde se permite más interferencia.	
	H7/k6	K7/h6		
Ajuste con interferencia	H7/n6	N7/h6	Fijación con interferencia : Apto para piezas que requieren rigidez y alineacion con precisión, pero sin requisitos especiales de presion en el agujero. Medianamente forzado: Adecuada para piezas de acero comunes o ajustes por encogimiento en secciones ligeras, lo más ajustado utilizable en hiero fundido. Fuerza: Ajuste adecuado para piezas que pueden estar bajo mucho esfuerzo o para ajuste con encogimiento donde las fuerzas de presion no son practicas.	Más Interferencia
	H7/p6	P7/h6		
	H7/s6	S7/h6		
	H7/u6	U7/h6		

3.3.2. Repetibilidad, precisión y resolución

Estos son conceptos clave en la descripción del desempeño de un robot industrial, estrechamente asociados a su calibración. Los procedimientos para determinar experimentalmente estos valores están descritos en la norma ISO 9283:1998, la cual fue cancelada en 2001 sin reemplazo, pero sigue siendo utilizada para evaluar el desempeño de manipuladores robóticos [10].

Repetibilidad

La repetibilidad hace referencia a la capacidad de un sistema de volver a una posición determinada reiteradas veces.

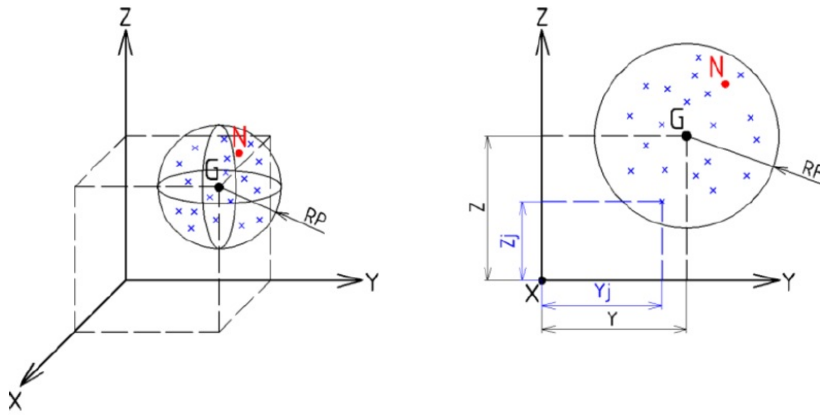


Figura 3.11: Representación gráfica de repetibilidad de posición unidireccional según ISO9283:1998 [10].

Tomando como referencia la notación de la imagen 3.11, la fórmula para la repetibilidad es:

$$RP = \bar{l} + 3S_l \quad (3.8)$$

Donde \bar{l} es el promedio de las desviaciones entre cada punto (x_j, y_j, z_j) alcanzado y el baricentro del grupo de puntos alcanzados $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$. S_l es la desviación estándar de la muestra.

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (3.9)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (3.10)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2} \quad (3.11)$$

Precisión

La precisión se refiere a la capacidad de un sistema de moverse precisamente a un punto deseado en el espacio.

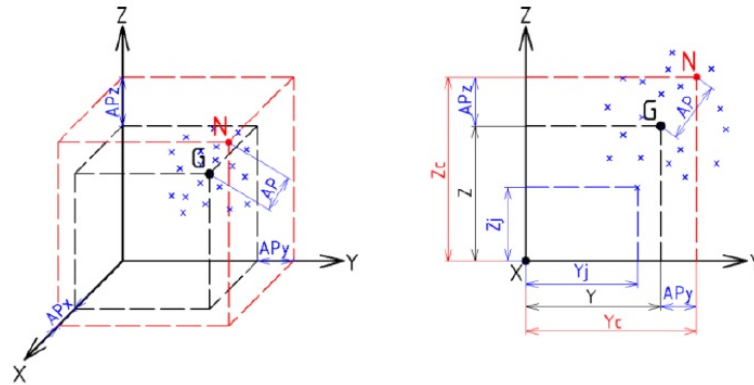


Figura 3.12: Representación gráfica de precisión de posición unidireccional según ISO9283:1998 [10].

Tomando como referencia la notación de la imagen 3.12, la fórmula para la precisión es:

$$AP = \sqrt{(AP_x)^2 + (AP_y)^2 + (AP_z)^2} \quad (3.12)$$

Donde:

$$AP_x = \bar{x} - x_c \quad (3.13)$$

$$AP_y = \bar{y} - y_c \quad (3.14)$$

$$AP_z = \bar{z} - z_c \quad (3.15)$$

El subíndice c hace referencia a la posición comandada, representada por el punto N en la figura 3.12. Mientras $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ representa el punto G, correspondiente al baricentro del grupo de puntos alcanzados, siendo (x_j, y_j, z_j) cada uno de los puntos alcanzados.

Resolución

Por otro lado la resolución se refiere al movimiento mínimo que puede realizar el robot. Está determinada por la fricción estática y la resolución de los sensores de posición (encoders) [28], es decir, los pasos que son capaces de contar en una revolución.

Capítulo 4

Ingeniería Conceptual

En esta sección se describen los lineamientos preliminares para la selección de componentes, basado en requerimientos de diseño, disponibilidad local de materiales y características de SCARA comerciales y académicos.

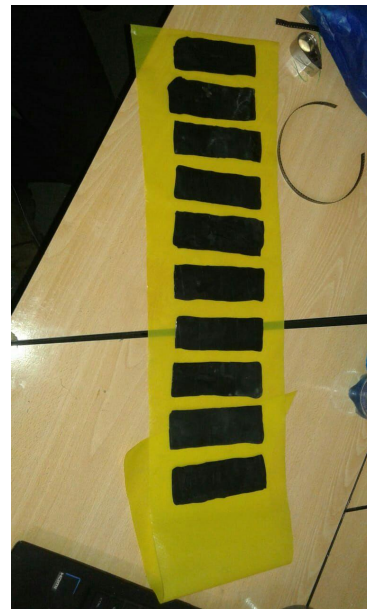
4.1. Parámetros de diseño

Como punto de partida para definir los parámetros de diseño se usa como referencia una potencial aplicación real del manipulador SCARA. Se consideran las necesidades de Nashira SpA (popularmente “RFIDudes”), un emprendimiento local de desarrollo y construcción de hardware electrónico, específicamente antenas RFID para neumáticos.

En su proceso productivo, la manipulación de mayor masa corresponde a antenas RFID de 12,5 [g] cada una, compuestas de cobre y caucho, dispuestas en arreglos de 10 filas x 3 columnas, sobre bandejas de aluminio de 500 [mm] x 450 [mm] x 3[mm] con un marco de silicona de 150 [g]. Considerando una densidad de $2,7[\frac{g}{cm^3}]$ para el aluminio, el conjunto tiene una masa aproximada de 2,348 [kg].



(a) Antenas RFID para neumáticos sin envoltorio de caucho.



(b) Antenas vulcanizadas en sus primeras versiones.

Figura 4.1: Objetos a manipular.

Las bandejas se mueven entre una mesa de trabajo y una máquina vulcanizadora a 800 [mm] de separación en el plano horizontal y diferencia de altura menor a 200 [mm].

Dentro del proceso también sería útil la automatización de la soldadura de chips y PCBs, para lo que se requeriría una repetibilidad de al menos 0,1 [mm].

Considerando lo anterior, se resumen en la tabla 4.1 los parámetros de diseño respondiendo el conjunto de preguntas *LOSTPED* mencionado previamente.

Tabla 4.1: Resumen parámetros de diseño.

Criterio	Valor / Observación
Carga (<i>Load</i>)	3 [kg]
Orientación	Tres ejes de rotación perpendiculares al plano horizontal
Velocidad (<i>Speed</i>)	Máxima menor o igual a 8 [m/s]
Recorrido (<i>Travel</i>)	Vertical: 200 [mm] Alcance: 668 [mm] Hombro: 180° Codo: 280°
Precisión	Maximizar repetibilidad en plano horizontal
Ambiente (<i>Environment</i>)	15°C - 25°C Material particulado de desbaste
Ciclo de trabajo (<i>Duty cycle</i>)	45 horas semanales

Con respecto a la carga, se debe considerar movimiento con carga nominal de 3 [kg] en subida, bajada y horizontal.

Los tres ejes de rotación asociados a las articulaciones del hombro, codo y A, son paralelos entre sí y perpendiculares al plano horizontal (como se presentó en la figura 3.6), lo que implica la transferencia de las cargas verticales en forma de momento desde los eslabones a los rodamientos de las articulaciones, exceptuando Z el cual transmite la carga a través del tornillo de bolas al motor respectivo.

La velocidad máxima a la que podría apuntarse viene de las referencias y es de 8 [m/s]. Sin embargo, en este desarrollo, se admiten velocidades máximas de operación menores, priorizando otros criterios como facilitar el uso reverso (*backdrivability*) y minimizar el *backlash* o juego intrínseco de las articulaciones.

Se limita el recorrido vertical a 200 [mm], el alcance del brazo estirado a 668 [mm], el recorrido del hombro a 180° y el recorrido del codo a 280°. Existen limitaciones físicas para el hombro, codo y Z, estas deben contemplar fines de carrera mecánicos y eléctricos. Se debe considerar además los recorridos necesarios en paradas de emergencia.

Se prioriza especialmente minimizar el *backlash* en las articulaciones del hombro y el codo, lo que influye en una mejor repetibilidad en el plano horizontal. En el eje vertical se permite menor precisión, dado el elevado costo de componentes de transmisión lineal de alta precisión.

Es probable que el prototipo funcional quede en el Fablab o en el taller de Molina, por lo que se espera una temperatura ambiente entre 15 y 25 °C. Ambos escenarios contemplan la eventual presencia de material particulado debido al trabajo con metales, plástico y madera, por lo que se considera representativo de un ambiente industrial. Esto implica la necesidad de sellar correctamente los rodamientos del ensamble. Por otro lado, se reconoce que el brazo robótico no representa una fuente de contaminación para estos entornos, sin embargo, se debe definir y respetar un perímetro de seguridad para prevenir accidentes asociados al funcionamiento del robot.

El brazo debe ser diseñado para permanecer operando al menos 45 horas semanales, asociado a la jornada laboral ordinaria.

4.2. Configuración SCARA

La configuración de este tipo de manipuladores sugiere la determinación de componentes por subensamble. La figura 3.6 presentó la configuración de este desarrollo, para ordenar su diseño se dividió en los subensambles:

- Base
- Conjunto motriz hombro
- Eslabón húmero (primer *link* móvil)
- Conjunto motriz codo
- Eslabón radio-cúbito (segundo *link* móvil, el cual contiene al conjunto motriz Z)
- Eslabón Z (tercer *link* móvil, el cual contiene al conjunto motriz A, encargado de la rotación del efector)

A continuación se presentan alternativas para la selección de componentes.

4.2.1. Materiales eslabones

Los robots SCARA se fabrican generalmente de aluminio, llegando a pesos totales cercanos a 30 [kg]. Dado que se busca desarrollar una alternativa relativamente económica, se considera la posibilidad de usar acero en las partes fijas y en algunas partes móviles. En la tabla 4.2 se muestran materiales disponibles localmente y algunas de sus características principales.

Acero bajo carbono

Candidato principal para fabricar la base, debido a su bajo costo, buena resistencia, maquinabilidad y soldabilidad. Para este eslabón estático no es importante el peso, por lo que importa más el criterio económico.

Duraluminio AA2017

Disponible localmente en forma de barras cilíndricas desde 16 a 300 [mm] de diámetro. Su buena maquinabilidad, alta resistencia y baja densidad, hacen que sea buen candidato para la fabricación de eslabones móviles.

Aluminio 6061

Disponible localmente en forma de bloques. Su buena maquinabilidad, alta resistencia y baja densidad, hacen que también sea buen candidato para la fabricación de eslabones móviles.

Plancha lisa aluminio AA1100 H14

Fácil de conseguir en espesores de 0,5 a 25 [mm]. Corresponde a una aleación para uso estructural y tiene mala maquinabilidad, sin embargo, es trabajada por servicios de corte laser locales, con tolerancias de hasta 0,2 [mm] en espesores menores o iguales a 5 [mm].

Perfiles aluminio 6063 T5 extruidos

Un caso particular de perfil extruido de aluminio 6063-T5 son los perfiles V-slot, los cuales estan disponibles localmente en dimensiones de 40x40, 20x20, 20x40, 20x60, 20x80 y 40x80 [mm]. Estos permiten una gran flexibilidad de ensamblaje, son comunmente utilizados en impresoras 3D y máquinas CNC. Su implementación en un manipulador SCARA podría facilitar la fabricación, modularidad y montaje de accesorios requeridos por el usuario final.

Tabla 4.2: Materiales disponibles localmente. Fuente datos: www.matweb.com.

Material	YTS [MPa]	UTS [MPa]	E [GPa]	Densidad [$\frac{g}{cm^3}$]
Acero SAE 1020	350	420	186	7,87
Acero SAE 1045	530	625	206	7,85
Acero SAE 4340	972	1448	200	7,85
Aluminio 6061 T4	145	241	68,9	2,7
Aluminio 6063 T5	145	186	68,9	2,7
Alumino AA2017	276	427	72,4	2,79

4.2.2. Motores

Los servomotores son ampliamente usados en robots industriales, generalmente corresponden a motores DC acoplados a una reductora, un encoder y un freno electromecánico. Esta combinación permite una gran precisión, ideal para robótica, sin embargo, los costos de los servomotores son muy elevados. Dentro de la gama de servomotores presentes en la figura 4.2 el más barato es de \$250 dólares, con tan solo 50 [W] [29].

Otra alternativa popular son los motores de paso o *steppers*. Fáciles de encontrar en impresoras 3D y máquinas CNC, tienen la desventaja de funcionar generalmente en lazo de control abierto. Existen motores stepper “híbridos”, los cuales incluyen un encoder y controlador que

permite trabajar en lazo cerrado. Estos poseen alto torque a bajas revoluciones, limitando la velocidad de operación.



(a) Gama de servomotores Clearpath.



(b) Motor stepper nema 23.

Figura 4.2: Servomotores y motor Stepper. Fuente: teknik.com y cimech3d.cl.

Otra alternativa atractiva, popular entre aficionados de la robótica y *makers* son los motores BLDC (normalmente utilizados en drones), los cuales poseen una curva de torque relativamente plana en función de la velocidad, permitiéndoles operar a alta velocidad. Mediante la placa de control ODrive [30] se pueden utilizar en conjunto con encoders para controlar su velocidad y posición, obteniendo un servomotor de bajo costo. ODrive es *Open Source* y posee una comunidad activa con muchos proyectos en curso. Algunos motores de interés compatibles con ODrive se muestran en la tabla 4.3.

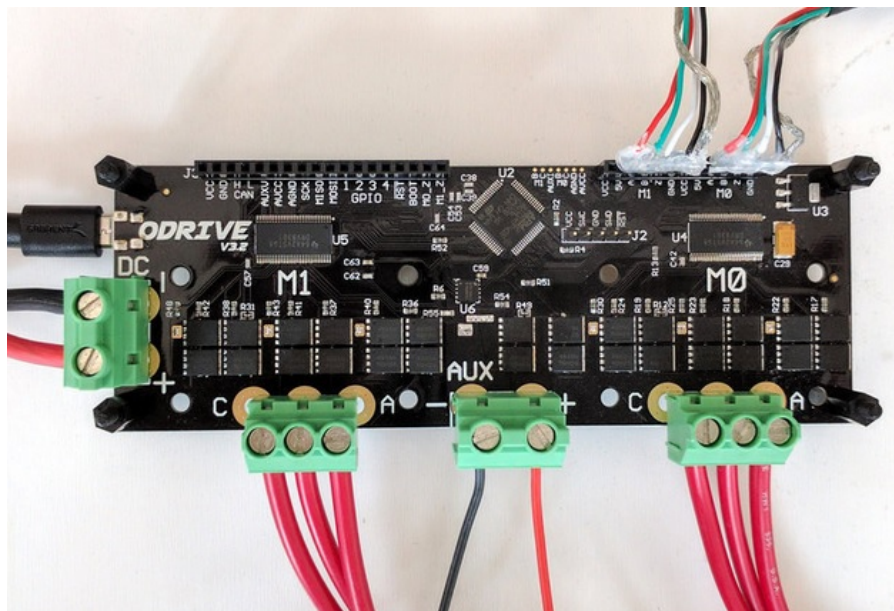


Figura 4.3: Placa ODrive para control de motores BLDC. Fuente: odriverobotics.com

Tabla 4.3: Algunos motores BLDC compatibles con ODrive.

Modelo	Torque [Nm]	[RPM] max	Peso [g]
ODrive Robotics D6374 - 150kv	3,86	5760	890
Turnigy Aerodrive SK3 - 6374-149kv	3,77	5722	840
9235-100KV Turnigy Multistar	4,71	3840	674

4.2.3. Transmisiones hombro y codo

Las velocidades máximas de operación de las articulaciones de un brazo robótico SCARA son del orden de los 400 [°/S] y 600 [°/S], es decir aproximadamente 67 [RPM] y 100 [RPM] para el hombro y el codo respectivamente. Estas velocidades requieren necesariamente de una reductora de velocidad para obtenerse utilizando motores DC.

Si se consideran los motores tentativos propuestos por la lista de ODrive, se nota que las velocidades máximas de operación de estos se encuentran entre 3840 [RPM] y 5760 [RPM]. Tomando como referencia 5760 [RPM], se necesitarían relaciones de reducción de aproximadamente 1:86 y 1:58 en el hombro y codo respectivamente. De esta forma es muy probable que se sobredimensione el torque disponible en cada articulación.

Otra forma de abordarlo, es conociendo el torque requerido en cada articulación y asignando la mínima relación de reducción para obtenerlo desde el torque nominal de los motores. De esta forma la relación de reducción sería mucho menor. Este enfoque permite aproximarse al concepto de articulaciones con conducción directa (*direct drive* [31]). Al usar reducciones de valores bajos, se disminuye la necesidad de varias etapas de reducción, disminuyendo el *backlash* y la fricción asociadas a la transmisión. Además, las relaciones bajas permiten que las articulaciones puedan moverse más fácil en forma reversa (*backdrivability*) y así permitir que se programen movimientos de forma física.

Para la selección de las transmisiones es importante considerar la relación (*ratio*), el costo, el peso, torque de operación, velocidad de operación y el *backlash*, que generalmente se busca minimizar en aplicaciones robóticas.

Considerando esto, las alternativas con menor peso y *backlash* presentes en el mercado son: reductoras planetarias y reductoras de *strainwave* o comunmente conocidas como *Harmonic Drive* (marca registrada).

Reductor planetario

Las reductoras planetarias son una alternativa de relativamente bajo costo, su principio de funcionamiento se basa en 3, 4 o 5 engranajes planeta girando entre un engranaje sol y una corona. Dependiendo de qué componente se fija, se tiene una relación de reducción de velocidad y un sentido en el eje de salida. Generalmente se fija la corona, y se utiliza el sol como eje de entrada, dejando el portaplanetas conectado al eje de salida. Puede haber más

de una etapa si se requieren reducciones altas, las relaciones de reducción disponibles en el mercado varían entre 1:3 y 1:100. Extractos de catálogo de reductoras planetarias con datos de *backlash* y otras especificaciones de diseño se presentan en las figuras B.1 y B.4 en anexos.

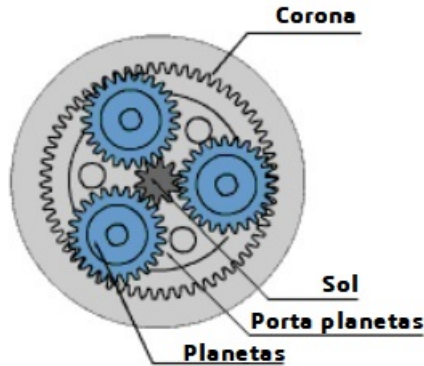


Figura 4.4: Esquema reductor planetario de una etapa. Modificado de [11].

La relación de reducción de velocidad de un reductor planetario donde el *input* corresponde al engranaje sol, el *output* al portaplanetas y donde la corona está fija, se puede obtener con la ecuación 4.1.

$$\frac{\omega_p}{\omega_s} = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} \quad (4.1)$$

Donde ω_p es la velocidad angular del portaplanetas, ω_s la velocidad angular del sol, Z_s el número de dientes del sol y Z_c el número de dientes de la corona.

Harmonic Drive

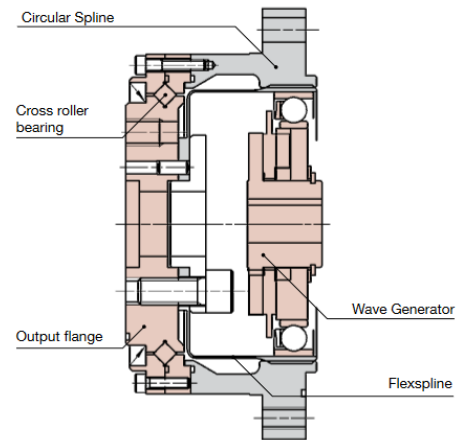
Las reductoras Harmonic Drive son considerablemente más caras, se usan generalmente en los robots SCARA, tienen la característica de ser compactas, livianas y prácticamente no poseer *backlash*. Su principio de funcionamiento se basa en tres componentes: un generador de onda como entrada, una corona fija con dientes internos y un tambor flexible *FlexSpline* como salida (componente con dientes externos, flexible radialmente pero rígido a la torsión), distinguibles en la figura 4.5. El generador de onda posee un rodamiento de forma ovalada, en el cual se instala externamente el flexible. Los dientes externos del flexible se acoplan con los dientes internos de la corona, generando contacto sólo en la parte ancha de óvalo impuesto por el generador de onda. En la figura B.5 en anexos se pueden revisar datos de *backlash* para algunas Harmonic Drive.

Tabla 4.4: Comparación entre reductora planetaria y Harmonic Drive para el mismo torque nominal de 50 [Nm].

	Backlash [rad]	Peso [Kg]
Planetaria	0,002327	1,4
Harmonic Drive	0,000044	0,98



(a) Componentes.



(b) Vista en corte.

Figura 4.5: Reductora Harmonic Drive. Fuentes: a) Harmonic Drive AG b) Catálogo CSG-CSF Gear Units.

En la medida que se rota el generador de onda, el flexible gira en sentido contrario a una velocidad menor, dada por la relación:

$$R = \frac{Z_F}{Z_F - Z_C} \quad (4.2)$$

Donde Z_F es el número de dientes del flexible y Z_C es el número de dientes de la corona. Generalmente la corona posee 2 dientes más que el flexible, por lo que la ecuación 4.2 da un valor negativo, asociado al movimiento en sentido contrario de la salida respecto de la entrada.

Un rodamiento de rodillos cruzados incluido en las unidades serie CSF y CSG permite montar esta reductora como articulación entre eslabones, sin necesidad de utilizar otros rodamientos en ese punto.

4.2.4. Transmisiones Z y A

Tornillo de bolas y ranura

En los robots SCARA modernos, el eje Z es actuado por un tornillo de bolas y ranura (*ball spline screw*) como el de la figura 4.6, capaz de realizar tanto el movimiento lineal de ascenso y descenso, como la rotación del efector. Es decir, este componente representa tanto la articulación prismática (J3) como la articulación rotacional (J4) o A como se llama en el resto de este documento. Su instalación se realiza generalmente con transmisión por correas para actuar tanto la tuerca que genera la traslación, como el componente solidario a la ranura que genera la rotación.

Este tipo de tornillos son una alternativa ideal debido a su alta precisión, bajo peso y sencillez de instalación, sin embargo, es un componente de costo elevado, del orden de los 700 [USD] o más por unidad.



Figura 4.6: Tornillo de bolas y ranura. Fuente: Catálogo TBI motion.

Tornillo de bolas más perfil extruido

Una alternativa de bajo costo es utilizar un perfil extruido V-slot dispuesto de forma vertical a modo riel entre ruedas de *delrin* como se aprecia en la figura 4.7. Este se puede acoplar a un tornillo de bolas (sin ranura) para generar la traslación vertical. Esta configuración es comunmente usada en el eje Z de algunas máquinas CNC con desplazamientos relativamente pequeños.

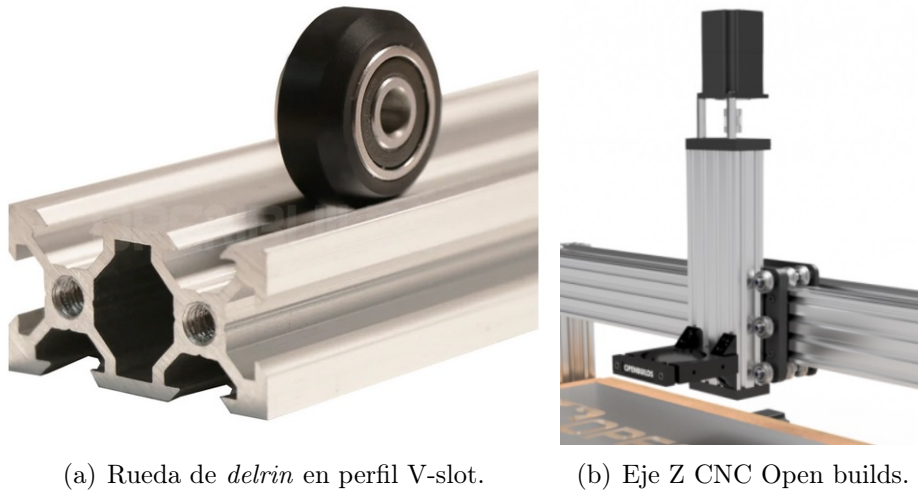


Figura 4.7: V-slot con tornillo para desplazamiento vertical. Fuente: Open Builds.

Al utilizar esta configuración sólo se cuenta con traslación en el eje Z, por lo que para lograr la rotación del efector de se debe implementar un actuador en la punta del perfil extruido.

4.2.5. Rodamientos hombro

Una buena referencia de disposición de rodamientos en la articulación del hombro es la del FUM SCARA presente en la figura 4.8.

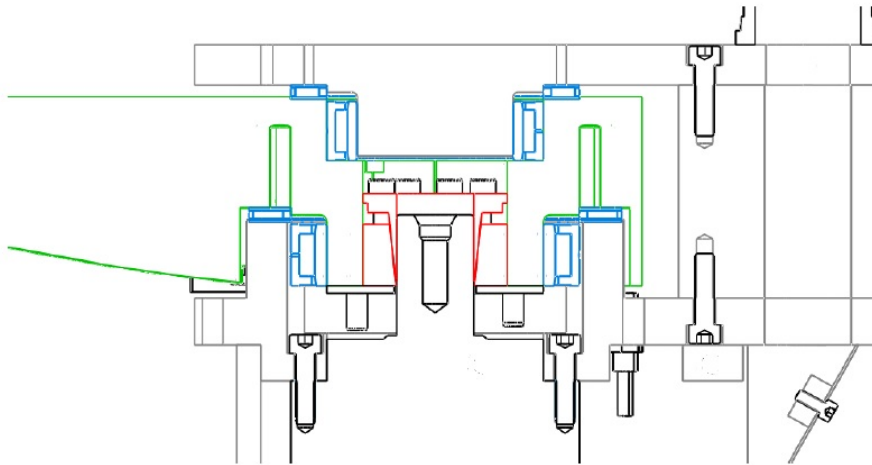


Figura 4.8: Articulación hombro FUM SCARA [12].

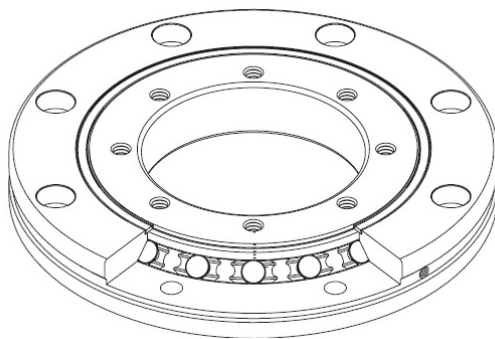
En la imagen se notan en color azul los rodamientos de agujas de carga radial y axial. La forma del alojamiento de estos en el primer eslabón y en la base, permite no utilizar ejes adicionales al de salida de la reductora.

Los rodamientos de agujas como los de la imagen, soportan sólo cargas radiales o axiales respectivamente, por lo que en teoría se consideran las cargas puramente horizontales sobre dos rodamientos de carga radial, y las cargas puramente verticales sobre dos rodamientos de carga axial.

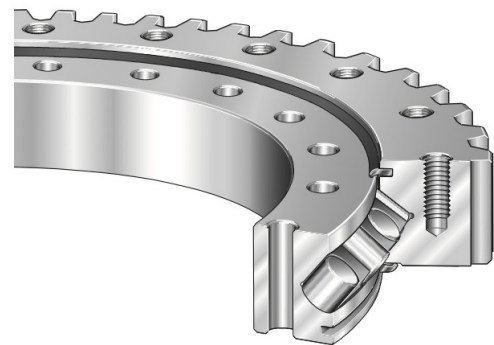
Los beneficios de este tipo de rodamientos incluyen una baja sección transversal, permitiéndoles acomodarse en aplicaciones con poco espacio, además, al poseer una gran cantidad de rodillos pequeños (agujas), permiten soportar cargas altas. También en el caso radial, al poder separarse en anillos interno y externo, se facilita el montaje con interferencia.

4.2.6. Rodamiento codo

Como se mencionó en la sección de alternativas de transmisión, una opción directa para usar en el codo es un rodamiento de rodillos cruzados, capaz de soportar cargas axiales, radiales y momentos. Esto les permite ser utilizados generalmente en articulaciones robóticas entre otras aplicaciones.



(a) Esquema corte rodamiento [32].



(b) Detalle disposición de rodillos [33].

Figura 4.9: Rodamiento de rodillos cruzados.

4.2.7. Acople entre ejes de transmisión y eslabones

Para este proyecto se considera la unión de los ejes de salida de las reductoras del hombro y del codo con el eslabón húmero y el eslabón radio cúbito respectivamente, mediante acoples sin chaveta, llamados también *power-lock* (nombre comercial de *Tsubaki*[34]).

En la figura 4.8, se nota en color rojo el componente que acopla el eje de salida de la reductora al primer eslabón, el cual corresponde a un acople sin chaveta, que realiza su función mediante presión radial ejercida por dos anillos cónicos comprimidos mediante pernos.

Capítulo 5

Metodología de cálculo

En esta sección se describen las distintas ecuaciones involucradas en la estimación de torque requerido en las articulaciones, la caracterización del tornillo de bolas, la vida de rodamientos en articulaciones y la estimación de repetibilidad.

5.1. Torque requerido en articulaciones rotatorias

Hombro y codo

Como se mencionó en el capítulo 3, la dinámica de un manipulador se puede obtener con la formulación de Euler-Lagrange. Para tener nociones en cuanto al torque requerido en las articulaciones se utilizan simplificaciones pertinentes. Si se simplifica el SCARA a un manipulador de 2 grados de libertad como el de la figura 3.7 y considerando nulas las fuerzas en el eje Z (ya que las cargas verticales son soportadas por los rodamientos y no por los motores) y omitiendo el efecto del roce dinámico tiene:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}}_{M(\theta)} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -h\dot{\theta}_2 & h(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ h\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}}_{C(\theta, \dot{\theta})} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Donde $M(\theta)$ es la matriz de masa o inercia (simétrica), $C(\theta, \dot{\theta})$ es la matriz con fuerzas centrífugas y de coriolis, τ_1 corresponde al torque requerido en el hombro y τ_2 al torque requerido en el codo. Los ángulos θ_1 y θ_2 corresponden a las rotaciones del hombro y el codo respectivamente.

$$m_{11} = m_1 r_{c_1}^2 + m_2 (r_1^2 + 2r_1 r_{c_2} \cos(\theta_2) + r_{c_2}^2) + I_{zz_1} + I_{zz_2} \quad (5.2)$$

$$m_{12} = m_{21} = m_2 (r_1 r_{c_2} \cos(\theta_2) + r_{c_2}^2) + I_{zz_2} \quad (5.3)$$

$$m_{22} = m_2 r_{c_2}^2 + I_{zz_2} \quad (5.4)$$

$$h = m_2 r_1 r_{c_2} \sin(\theta_2) \quad (5.5)$$

Los valores de m_1 y m_2 son las masas del eslabón húmero y radio-cúbito respectivamente. El largo r_1 es la distancia entre el hombro y el codo. El valor de r_{c_1} corresponde a la distancia desde el hombro al centro de masa del eslabón húmero y r_{c_2} a la distancia desde el codo al centro de masa del eslabón radio-cúbito. I_{zz_1} y I_{zz_2} son los momentos de inercia del eslabón húmero y el eslabón radio-cúbito en Z con respecto a su centro de masa, respectivamente.

Articulación A

La velocidad de rotación en A no es un parámetro prioritario en el diseño de este robot, es decir, no se requiere que esta articulación cumpla con ser relativamente rápida.

Asumiendo la carga centrada e imponiendo una aceleración máxima $\ddot{\theta}_{A_{max}}$ para la articulación, el torque máximo $\tau_{A_{max}}$ requerido en la articulación se obtiene simplemente con la segunda ley de Newton de forma rotacional.

$$\tau_{A_{max}} = I_A \ddot{\theta}_{A_{max}} \quad (5.6)$$

Donde I_A corresponde al momento de inercia de la carga.

5.2. Torque requerido en actuador de articulación prismática

Este corresponde al torque requerido al motor del eje Z, el cual se acopla a un tornillo de bolas. Se aproxima el tornillo de bolas a uno de rosca cuadrada para estimar el torque requerido al motor, necesario para actuar el movimiento prismático en el eje Z.

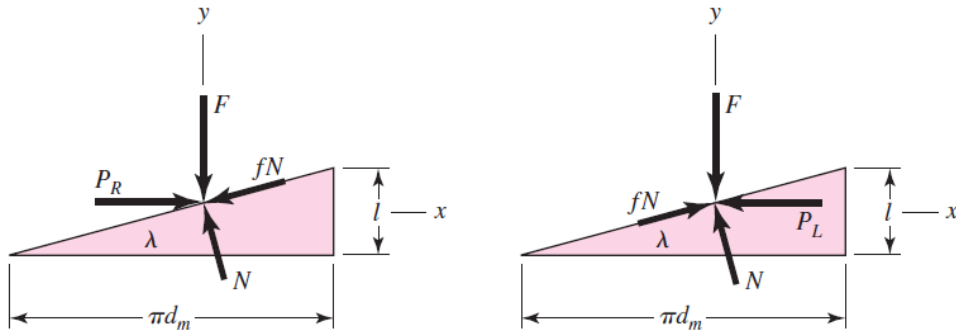


Figura 5.1: Diagrama de cuerpo libre representando subida (izquierda) y bajada (derecha) de carga. [13].

En la figura 5.1 l representa el paso del tornillo, d_m el diámetro, P_r la fuerza necesaria para subir la carga, P_L la fuerza necesaria para bajar la carga, fN la fricción y F la carga.

Subida de carga

$$T_{subida} = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l}{\pi d_m} + f \right) \quad (5.7)$$

Bajada de carga

$$T_{bajada} = \frac{Fd_m}{2} \frac{\left(\frac{l}{\pi d_m} - f\right)}{\left(1 + \frac{fl}{\pi d_m}\right)} \quad (5.8)$$

Por sugerencia del mismo libro (Shigley) [13], el coeficiente de fricción f varía entre 0,1 y 0,15. Se deduce directamente que el torque requerido para subir la carga es mayor, por lo que se debe considerar este al momento de dimensionar el torque requerido al motor Z. Junto con la carga se debe considerar la aceleración requerida en el movimiento.

5.3. Tornillo de bolas

Las ecuaciones para determinar la vida, carga máxima y velocidad máxima permisibles del tornillo de bolas se pueden encontrar en catálogos de THK [35] y HIWIN [36].

5.3.1. Vida

La vida en revoluciones de un tornillo de bolas dispuesto verticalmente, cuya tuerca no posee precarga, se puede estimar con la ecuación 5.9.

$$L = \left(\frac{C}{F_a}\right)^3 \cdot 10^6 \quad (5.9)$$

Donde C es la carga dinámica de catálogo del componente en [kgf] y F_a es la carga axial resultante a la que se somete el componente.

5.3.2. Carga máxima permisible

Esta está determinada por la carga crítica de pandeo admisible por el tornillo de bolas. Esta se puede estimar con la ecuación 5.10.

$$F_p = 0,5 \cdot 399 \cdot \left(\frac{N_f \cdot d^4}{l^2}\right) \quad (5.10)$$

Donde F_p es la carga máxima permisible en [kN], el factor 0,5 se usa como factor de seguridad. El valor de d corresponde al diámetro del tornillo en [mm], l es el largo entre apoyos en [mm] y N_f es el factor para distintos tipos de apoyo, el cual corresponde a 0,5 para configuraciones con un extremo fijo y el otro soportado.

5.3.3. Velocidad máxima permisible

Esta está determinada por la primera frecuencia natural del tornillo. La velocidad de operación debe estar bajo este valor para evitar vibraciones y fallas. Este valor se puede obtener con la ecuación 5.11.

$$N_p = 0,8 \cdot 2,71 \cdot 10^8 \cdot \frac{M_f \cdot d}{l^2} \quad (5.11)$$

Donde N_p es la velocidad máxima permisible en [RPM] el factor 0,8 se usa como factor de seguridad. El valor de d corresponde al diámetro del tornillo en [mm], l es el largo entre apoyos en [mm] y M_f es el factor para distintos tipos de apoyo, el cual corresponde a 0,689 para configuraciones con un extremo fijo y el otro soportado.

5.4. Rodamientos

5.4.1. Hombro

Los rodamientos de agujas utilizados en el hombro se pueden caracterizar con las ecuaciones sugeridas por catálogo [37].

La vida nominal básica en millones de revoluciones, para una confiabilidad del 90 % según la norma ISO 281 se expresa según la ecuación 5.12.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} \quad (5.12)$$

Donde C corresponde a la capacidad de carga dinámica básica del rodamiento en [kN], mientras P corresponde a la carga dinámica equivalente del rodamiento en [kN]. El exponente $\left(\frac{10}{3}\right)$ es específico para rodamientos de rodillos.

Considerando velocidad de operación constante, la vida en horas se obtiene con la ecuación 5.13.

$$L_{10h} = L_{10} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (5.13)$$

Donde n es la velocidad de operación en [RPM].

Para los rodamientos de carga axial, la carga mínima a la que debe someterse el rodamiento para que sus rodillos rueden apropiadamente se calcula con la ecuación 5.14.

$$F_{am} = 0,0005 \cdot C_0 \quad (5.14)$$

Donde F_{am} representa la carga mínima axial en [kN] y C_0 es la capacidad de carga estática básica en [kN] presente en los catálogos.

Para los rodamientos de carga radial, la carga mínima a la que debe someterse el rodamiento para que sus rodillos rueden apropiadamente se calcula con la ecuación 5.15.

$$F_{rm} = 0,02 \cdot C_0 \quad (5.15)$$

Donde F_{rm} representa la carga mínima axial en [kN] y C_0 es la capacidad de carga estática básica en [kN] presente en los catálogos.

Los rodamientos de agujas soportan cargas puramente radiales o axiales, por lo que las cargas dinámicas equivalentes (P) y estáticas equivalentes (P_0) son iguales a las cargas externas radiales o axiales respectivamente, dependiendo del tipo de rodamiento.

Se define el factor de seguridad estática con la ecuación 5.16.

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (5.16)$$

Donde C_0 es la capacidad de carga estática básica en [kN] presente en los catálogos y P_0 es la carga estática equivalente del rodamiento en [kN].

5.4.2. Codo

El rodamiento de rodillos cruzados del codo se puede caracterizar con las ecuaciones sugeridas por catálogo [32].

La vida del rodamiento está dada por:

$$L = \left(\frac{f_t C}{f_w P_c} \right)^{\frac{10}{3}} \cdot 10^6 \quad (5.17)$$

Donde L corresponde a la vida en revoluciones que puede alcanzar el 90 % de un grupo de rodamientos de rodillos cruzados idénticos operando en las mismas condiciones. C es la carga dinámica básica, la cual corresponde a la carga radial con dirección y magnitud constante, a la cual L tiene un valor de 10^6 revoluciones, esta se indica en los catálogos. P_c es la carga radial dinámica equivalente de la ecuación 5.18. El valor f_t corresponde al factor de temperatura (el cual es 1 para temperaturas de operación menores a 100°C) y f_w al factor de carga, el cual es de 1,2 a 1,5 en condiciones de operación normales (sin impactos severos).

$$P_c = X \cdot \left(F_r + \frac{2M}{d_p} \right) + Y \cdot F_a \quad (5.18)$$

En la ecuación 5.18 F_r es la carga radial, F_a es la carga axial y M es el momento al que el rodamiento es sometido en operación. El valor d_p corresponde al diámetro que recorren los rodillos cruzados (valor de catálogo) y los factores X e Y corresponden a factores dinámicos radial y axial respectivamente, estos se determinan según la siguiente clasificación.

Tabla 5.1: Factores dinámicos radial y axial de rodamiento de rodillos cruzados.

Clasificación	X	Y
$\frac{F_a}{F_r + 2M/d_p} \leq 1,5$	1	0,45
$\frac{F_a}{F_r + 2M/d_p} > 1,5$	0,67	0,67

5.5. Estimación de repetibilidad

Una estimación de *backlash* se puede obtener con el modelo simplificado descrito en [14]. Este asume que los contactos con juego en la transmisión pueden ser como se aprecia en la figura 5.2, sin considerar roce y de forma plástica, es decir, sin rebote. La ecuación deducida sugiere que la repetibilidad es función del *backlash* y las inercias del motor y la carga.

$$RP = \frac{-2\Delta}{1 + \frac{I_L}{I_M}} \quad (5.19)$$

Donde I_L es la inercia de la carga (transmisión y eslabones) y I_M es la inercia del motor. El valor de 2Δ corresponde al *backlash* indicado en el catálogo de la transmisión.

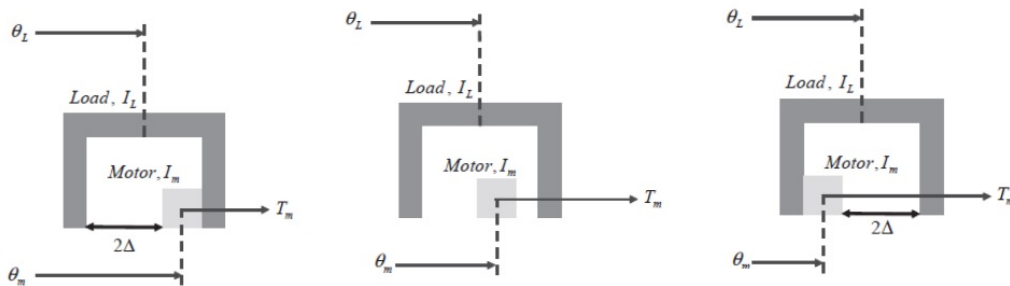


Figura 5.2: Esquema simplificación de estados para estimación de *backlash* según [14].

Capítulo 6

Resultados de diseño

Se presentan los resultados obtenidos de la primera aproximación con sólidos en CAD, con estimaciones de los torques requeridos y cargas en cada articulación. Después se abarcan los resultados del diseño final mediante simulación dinámica, determinando los parámetros de operación reales a comprobar con las pruebas de funcionamiento. Se presentan también los principales componentes comerciales seleccionados y sus características. Luego se muestran resultados de análisis de elemento finito para componentes de interés. Finalmente se menciona la generación de URDF compatible con ROS.

6.1. Diseño preliminar

Se realizó un modelo simplificado asignando masas estimadas a cada eslabón para estimar mediante simulaciones dinámicas en Inventor (software CAD) los torques requeridos en el hombro y el codo para cumplir una trayectoria deseada. Cabe destacar que estas simulaciones se realizaron sin considerar roce. El modelo contempla uso de cilindros de acero, con masas de 5[kg] para el húmero y 14 [kg] para el radio-cúbito (9 [kg] más carga de 5 [kg] en el efector).

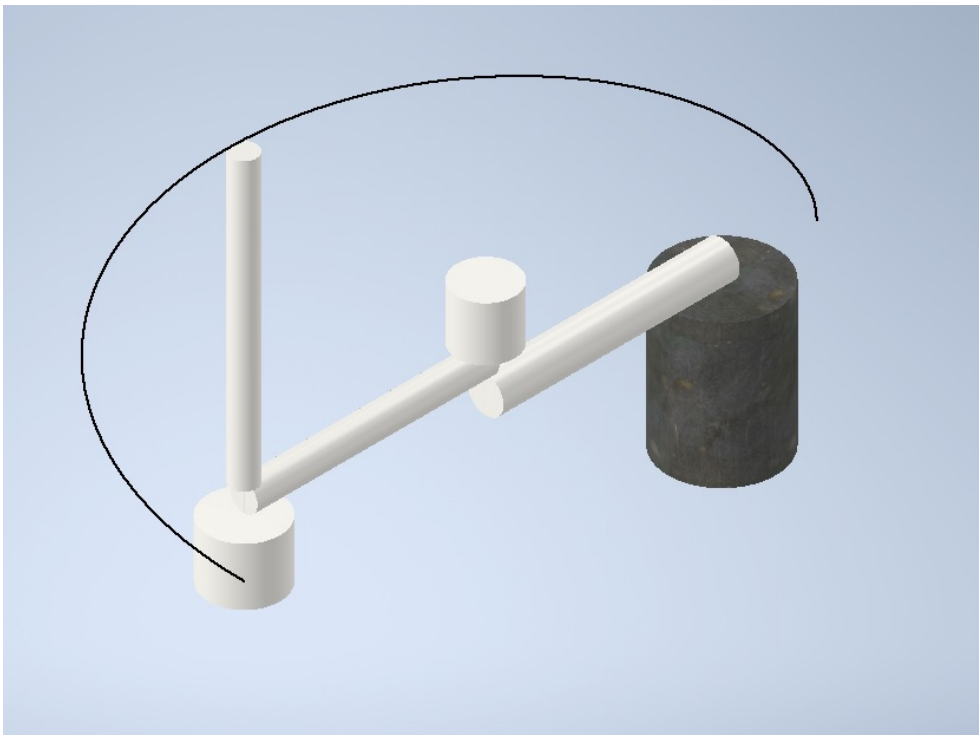
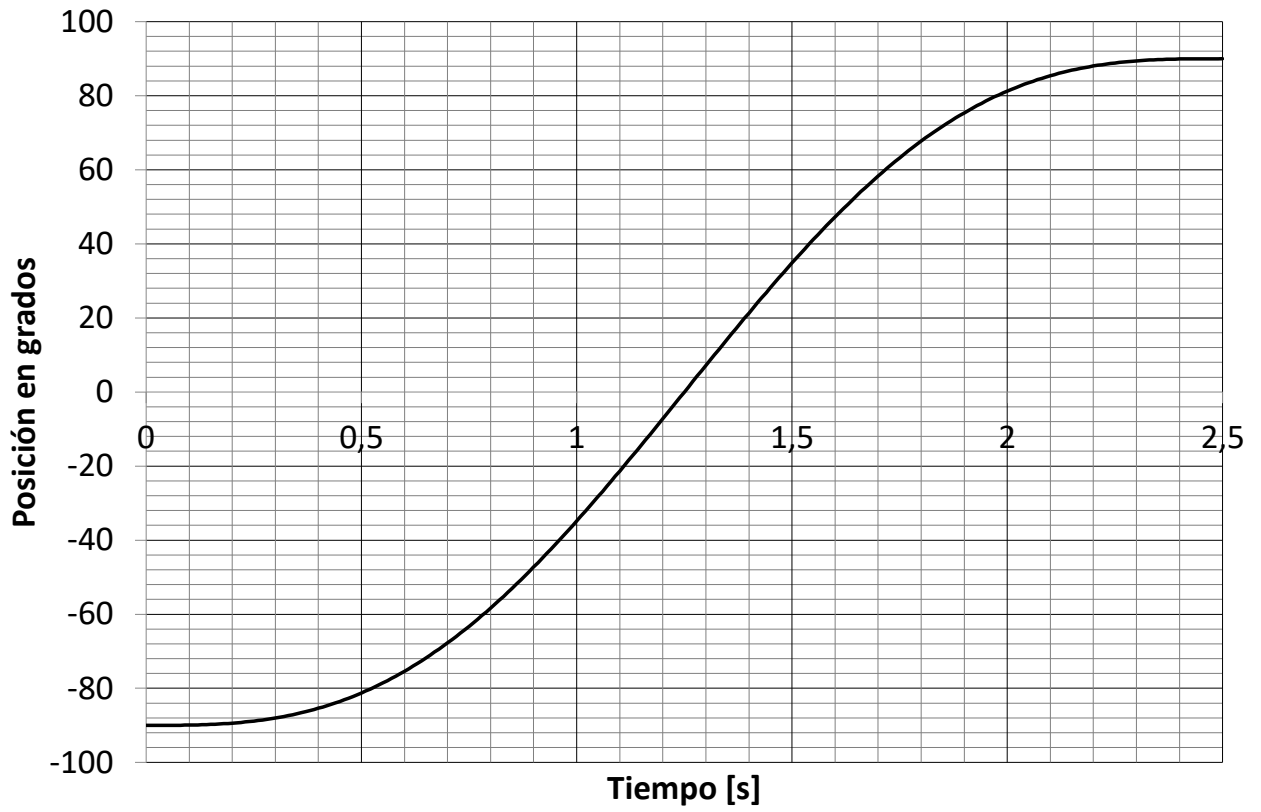
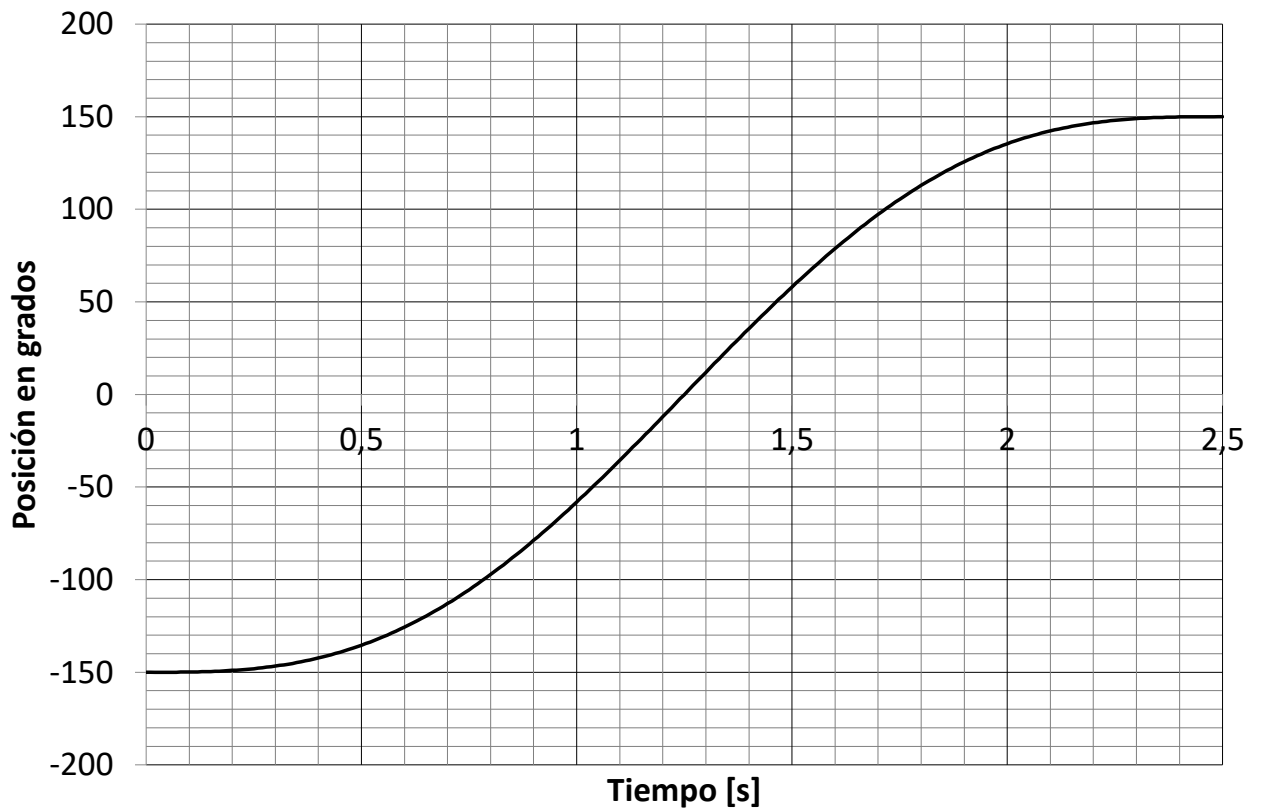


Figura 6.1: Modelo de sólidos simplificado para primeras estimaciones.

De las simulaciones dinámicas preliminares obtenidas con el modelo de la figura 6.1 se obtiene un torque estimado requerido en el hombro de 40,8 [Nm] y 5,5 [Nm] en el codo. Las trayectorias simuladas se muestran en la figura 6.2, donde se aprecia que el hombro recorre 180° y el codo 300° , ambos en un tiempo de 2,5 [s]. La velocidad máxima alcanzada en el extremo del efector es de 3 [m/s]. La distancia entre hombro y codo es de 330 [mm] y entre codo y efector de 338 [mm], las mismas del diseño final.



(a) Posición hombro.



(b) Posición codo.

Figura 6.2: Trayectorias de hombro y codo en modelo simplificado.

El diseño se iteró en base a los lineamientos señalados en la ingeniería conceptual. La primera iteración se muestra en la figura 6.3.



Figura 6.3: Primera iteración de diseño realizada en Solidworks (software CAD).

6.2. Diseño final

La priorización de los criterios de uso reverso y repetibilidad, más los resultados de las simulaciones dinámicas realizadas durante las iteraciones de diseño, permitieron definir los componentes finales que forman parte del brazo robótico.

El diseño final se presenta en la figura 6.4, este cuenta con una base soldada y apernada de acero de bajo carbono SAE 1020, conjuntos motrices apernados a placas de aluminio AA1100 H14 en espesor de 5 [mm] cortadas con laser, eslabón húmero mecanizado desde barra cilíndrica de duraluminio AA2017 de 100 [mm] de diámetro, eslabón radio cúbito de perfiles de aluminio V-slot 6063-T5 de 20x40 [mm] montados en una placa principal de aluminio 6061-T6 mecanizada, con placas accesorias de aluminio AA1100, y una última articulación A, con piezas de aluminio AA1100 y PLA. Los subensambles se aprecian en la figura 6.5.

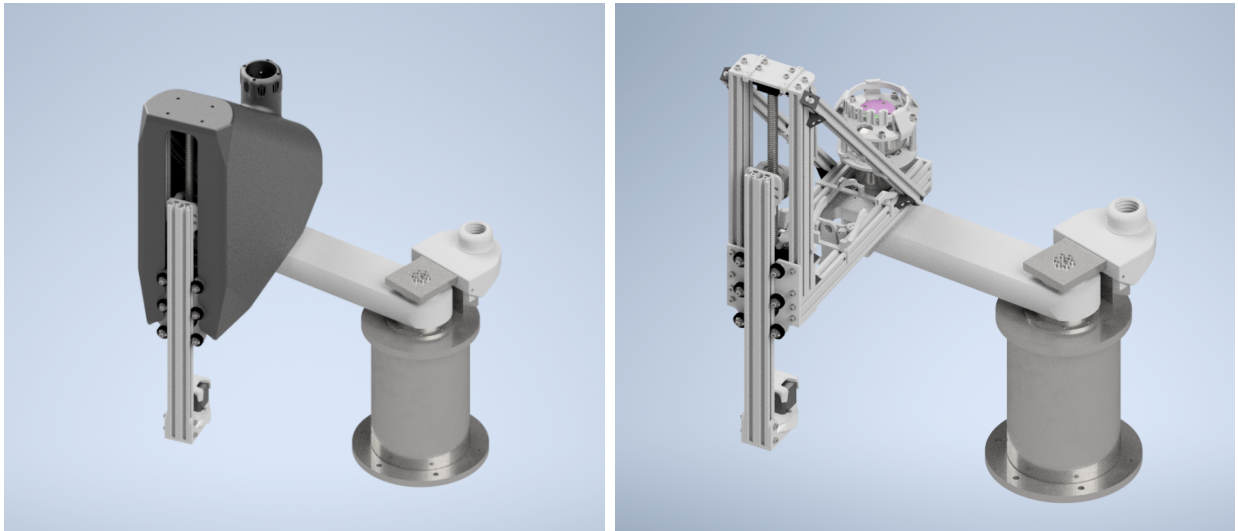


Figura 6.4: *Renders* SCARA con y sin carcasa realizados en Inventor (software CAD).

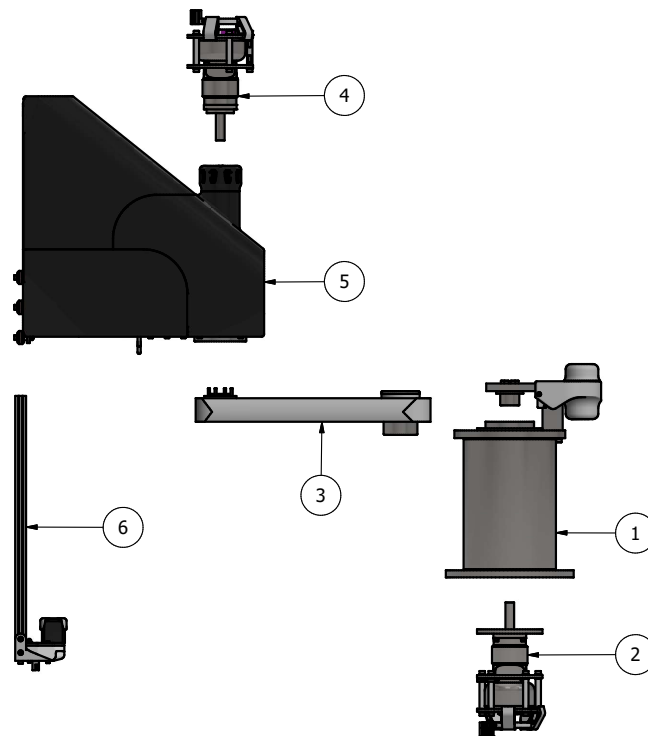


Figura 6.5: Subensambles SCARA. (1) Base. (2) Conjunto motriz hombro. (3) Eslabón húmero. (4) Conjunto motriz codo. (5) Eslabón radio-cúbito. (6) Eslabón Z.

6.2.1. Simulación dinámica

En este caso, se utilizó el diseño final con una carga de 5 [kg] en el efector con la posición más elevada en el eje Z, realizando un ciclo de trabajo variando la posición de forma cicloidal, completando el rango de movimiento completo de las articulaciones del hombro y del codo en 2,5 segundos. Con esto se pueden obtener torques estimados requeridos en las articulaciones, también una idea del comportamiento y velocidad de operación del brazo. Los componentes tienen incluidas sus propiedades físicas y mecánicas según sus materiales, por lo que se cuenta con masas e inercias representativas.

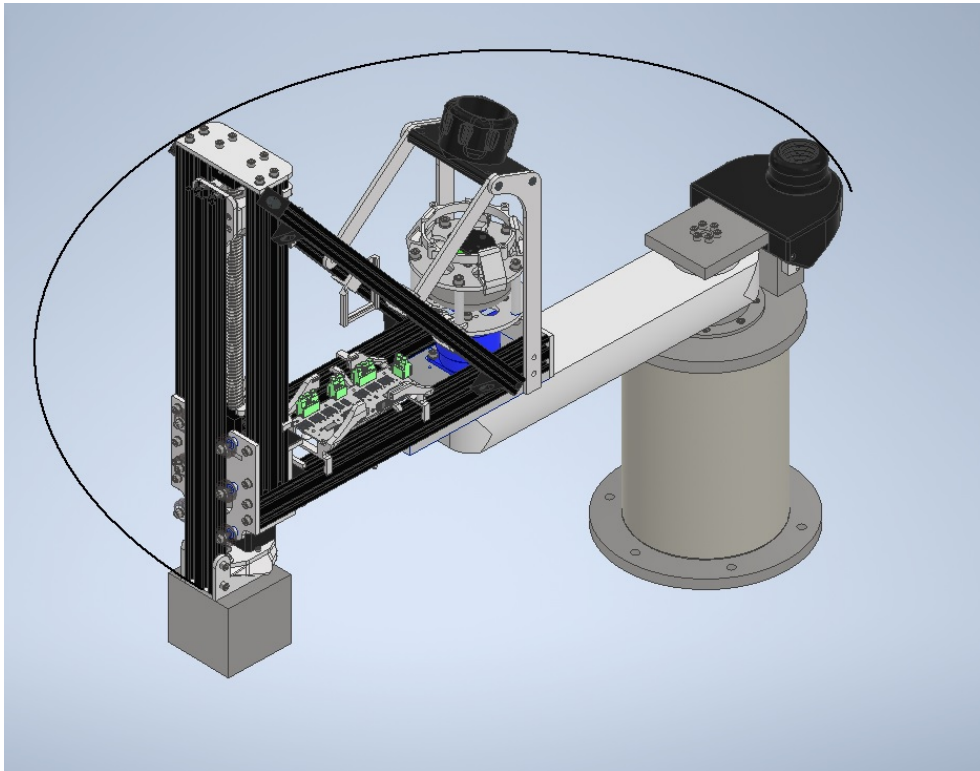
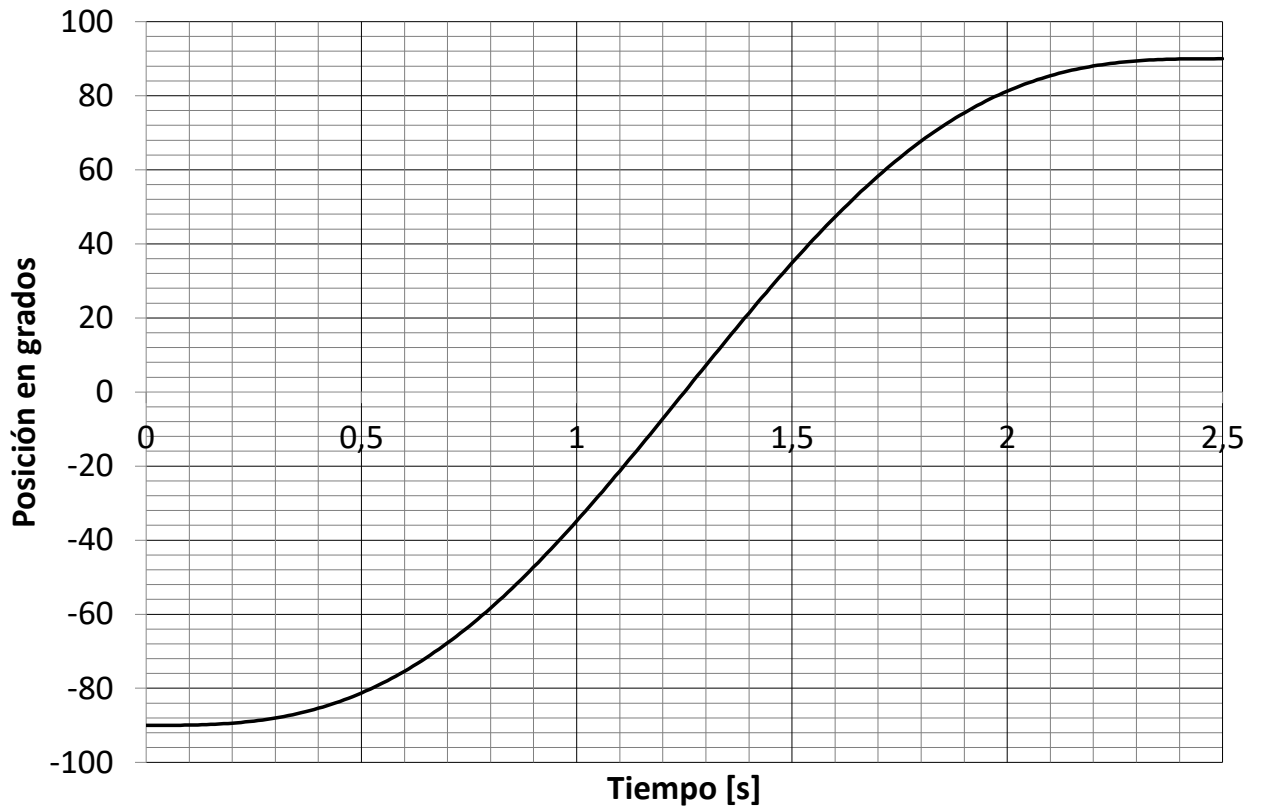


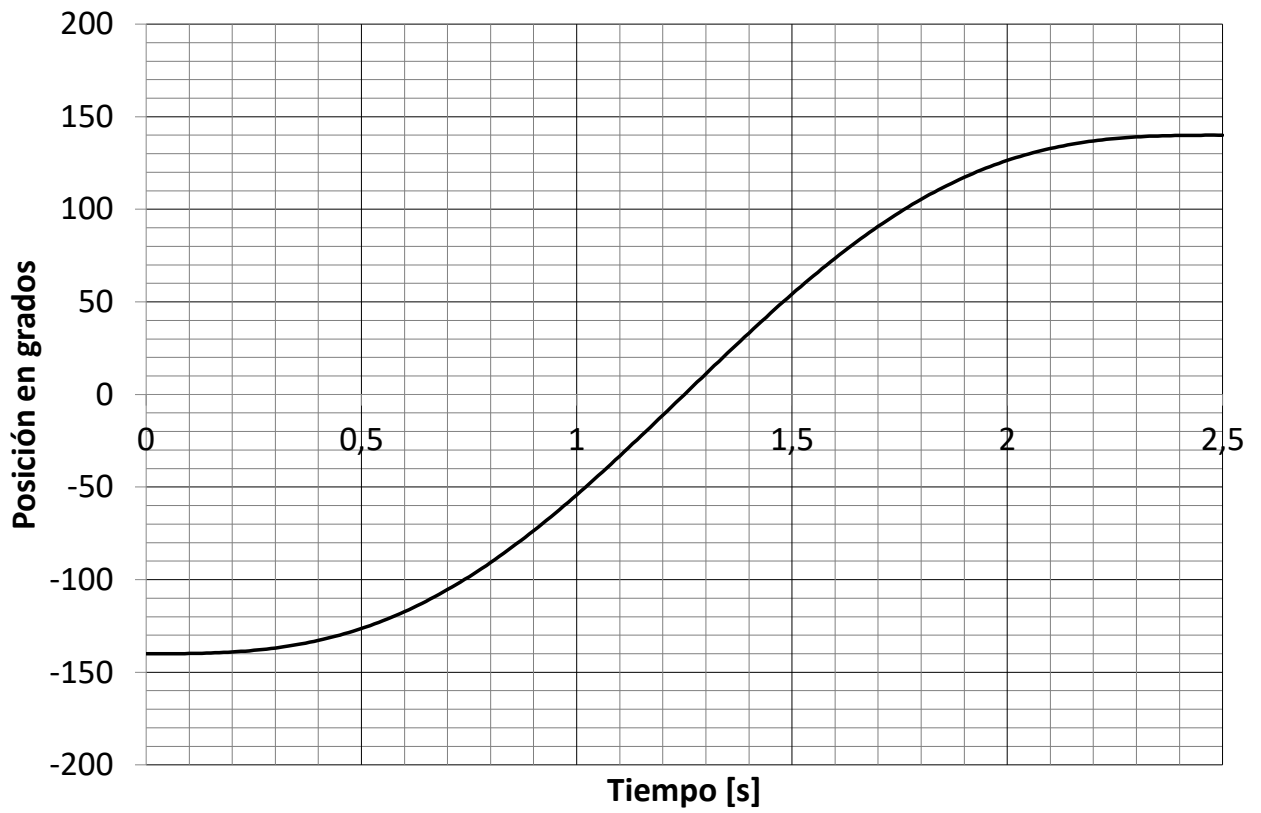
Figura 6.6: Diseño final en simulación dinámica.

Se obtiene un torque máximo requerido en el hombro de 41,3 [Nm] y 6,1 [Nm] en el codo. Las trayectorias simuladas se muestran en la figura 6.7, donde se aprecia que el hombro recorre 180° y el codo 280°, ambos en un tiempo de 2,5 [s]. La velocidad máxima alcanzada en el extremo del efector es de 3 [m/s]. La distancia entre hombro y codo es de 330 [mm] y entre codo y efector de 338 [mm]. Los resultados gráficos obtenidos de la simulación se presentan en las figuras 6.7, 6.8 y 6.9.

De este mismo escenario se obtiene que el hombro experimenta una fuerza axial de 212 [N] y una fuerza radial máxima de 182 [N]. El codo experimenta una fuerza axial de 168 [N] y una fuerza radial máxima de 178 [N]. Estos valores se utilizan en la estimación de vida de los rodamientos y como fuerzas externas en los análisis de elemento finito.

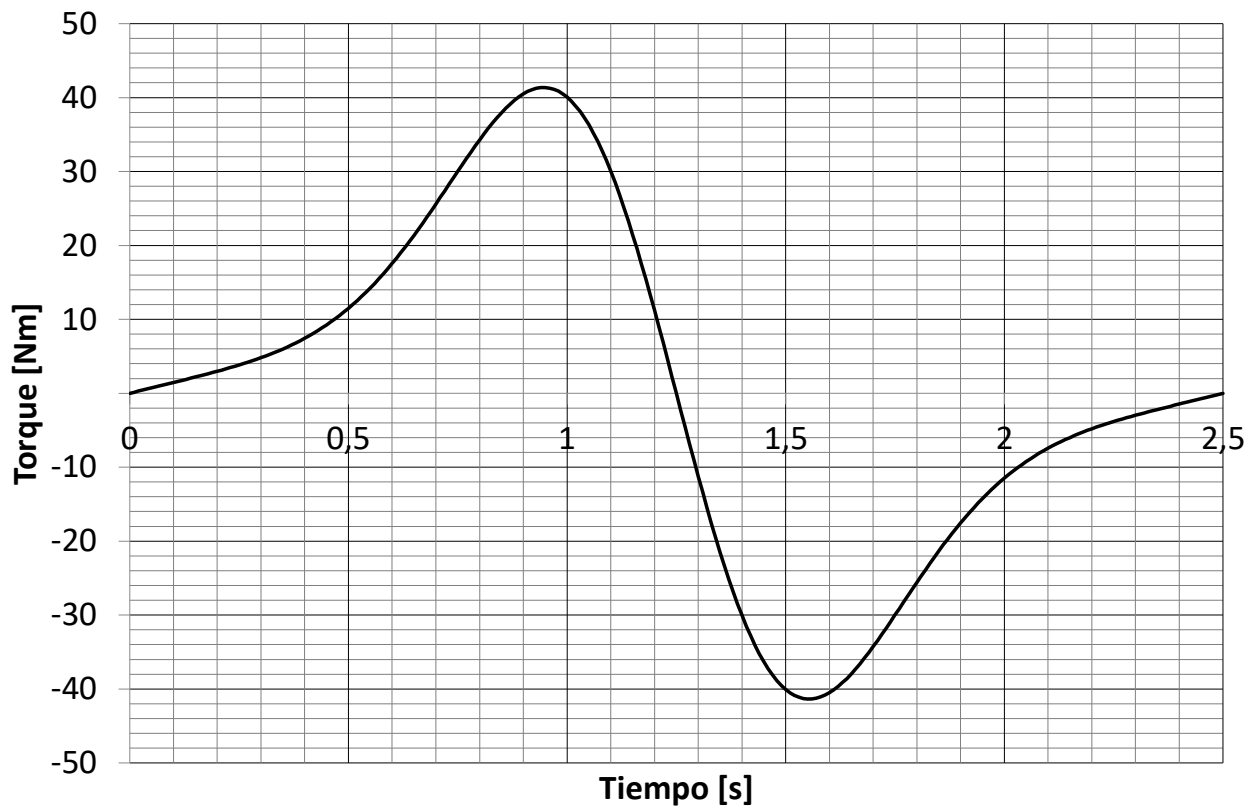


(a) Posición hombro.

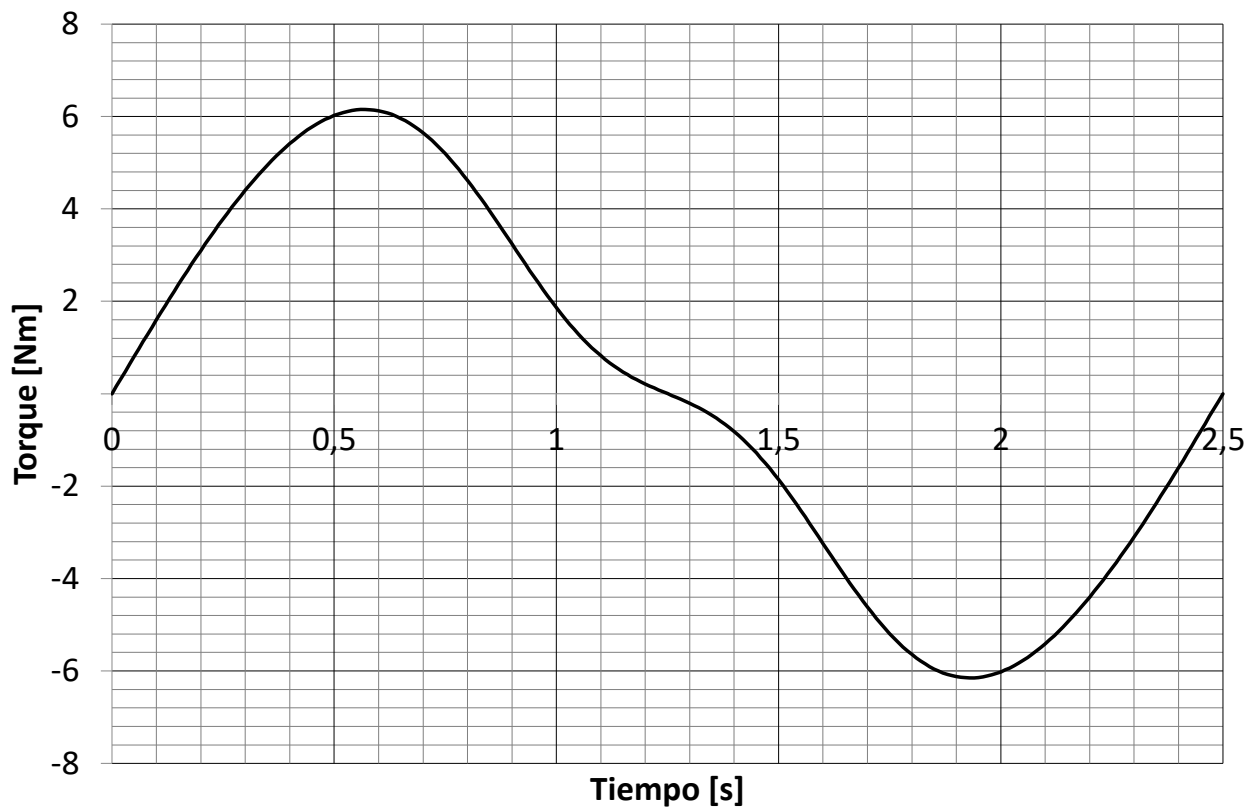


(b) Posición codo.

Figura 6.7: Trayectorias de hombro y codo.



(a) Torque requerido en hombro.



(b) Torque requerido en codo.

Figura 6.8: Torques requeridos en hombro y codo.

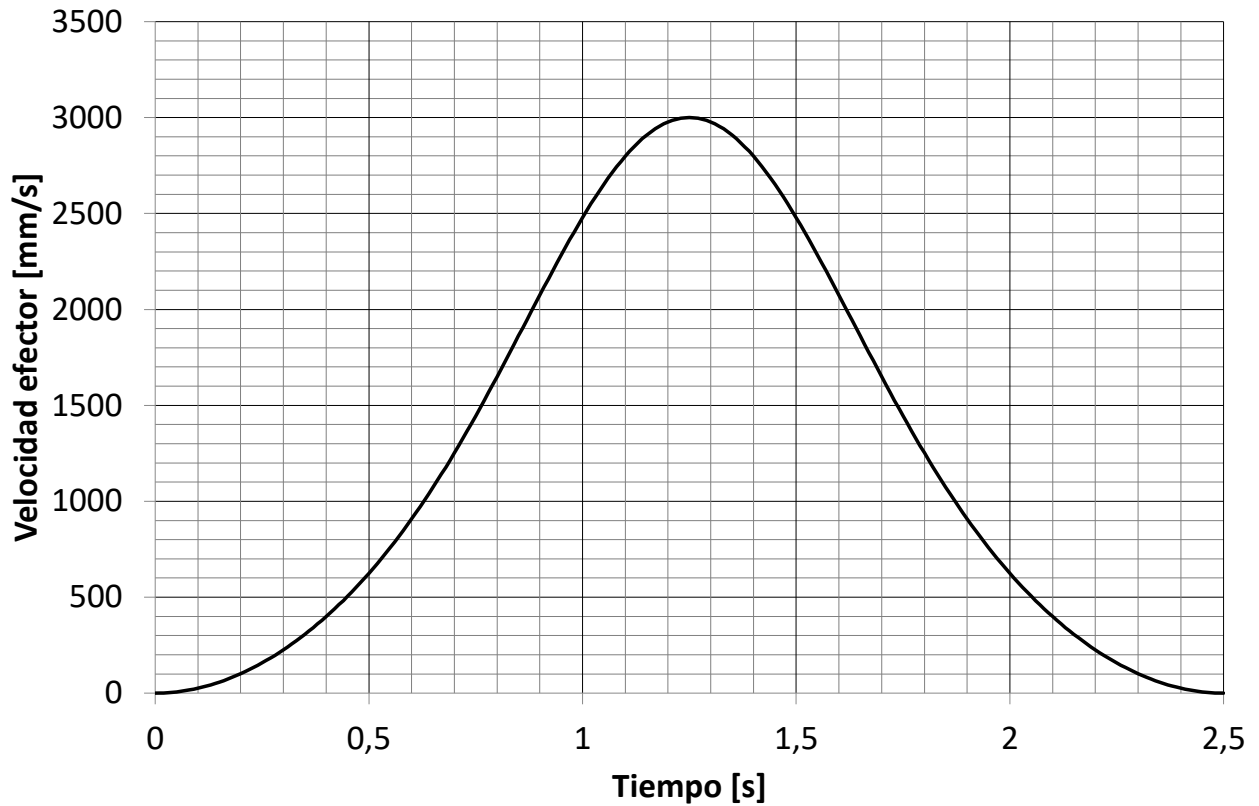


Figura 6.9: Velocidad en el efector.

6.2.2. Componentes seleccionados

Motores y encoders

Se seleccionan motores BLDC para las articulaciones rotatorias del hombro y codo. También para la articulación prismática del eje Z. Estos tres son marca Herlea y se muestran en la figura 6.10, se utilizan generalmente en drones agrícolas y son compatibles con las placas de control *Odrive*. Sus características se presentan en la tabla 6.1. Considerando las reducciones de 1:7 de las reductoras planetarias, los torques disponibles en las articulaciones deberían permitir cumplir con las condiciones simuladas en la sección

Tabla 6.1: Motores seleccionados para hombro, codo y Z.

Motor	Aplicación	Costante de velocidad Kv	I_{max} [A]	V_{max} [V]	Potencia [kW]	Torque [Nm]
8325	Hombro	120	90	50	4,35	7,21
8318S	Codo	120	69	48	3,35	4,95
5408	Z	260	28	33,3	0,81	0,89

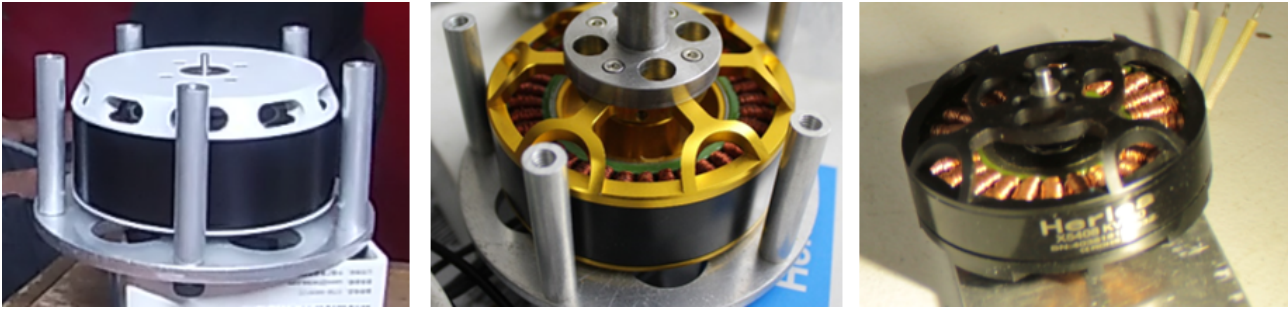


Figura 6.10: Motores seleccionados. De izquierda a derecha: Hombro, codo, Z.

Para la articulación A se utiliza un motor *stepper* Nema 17 de 45 [N·cm], presente en la figura 6.11. Este se acopla a un engranaje recto de módulo 1,5 y 20 dientes, para transmitir torque a un eje solidario con un engranaje recto en relación 1:1.

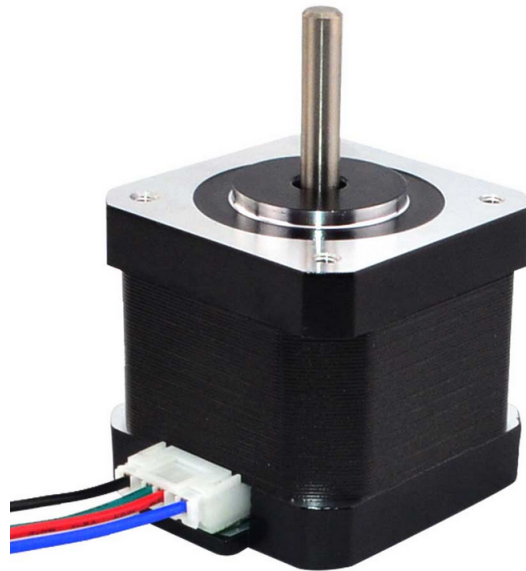


Figura 6.11: Motor stepper Nema 17 de 45 [N·cm]. Fuente: Cimech.cl.

Se seleccionaron encoders AMS - AS5047P (figura 6.12) para todas las articulaciones. Al conectarse por SPI permiten una resolución de 14 bits, lo que con la reducción de 1:7 y las dimensiones de los eslabones, se traduce en una resolución entre 8 y 37 [μm] en el espacio de trabajo del robot.

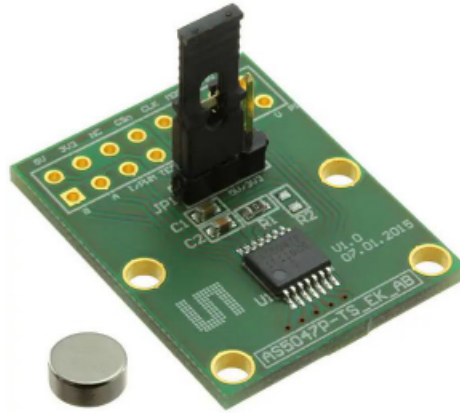


Figura 6.12: Encoder AS5047P. Fuente: ams.com.

Reductores planetarios

Se seleccionan reductores planetarios de una etapa con relación 1:7 para el hombro y el codo (figura 6.13). Para simplificar el encargo internacional y la modularidad del ensamble, se decidió utilizar el mismo componente para ambas articulaciones. Se seleccionó la relación de 1:7 debido a que según catálogo, posee el máximo torque de *output* nominal en las dimensiones requeridas, además al ser de una etapa permite facilitar el uso reverso (*backdrivability*) con el mínimo *backlash*, de 3 minutos de arco según catálogo. El eje de salida ofrecido por catálogo es de 28 [mm] de largo, por lo que se tuvo que solicitar al proveedor la modificación de este a 50 [mm] para que pudiera ensamblarse según el diseño realizado. Como se muestra en la imagen B.2 en Anexos, el torque de *output* nominal de este componente es de 45 [Nm] con un máximo de 67,5 [Nm].

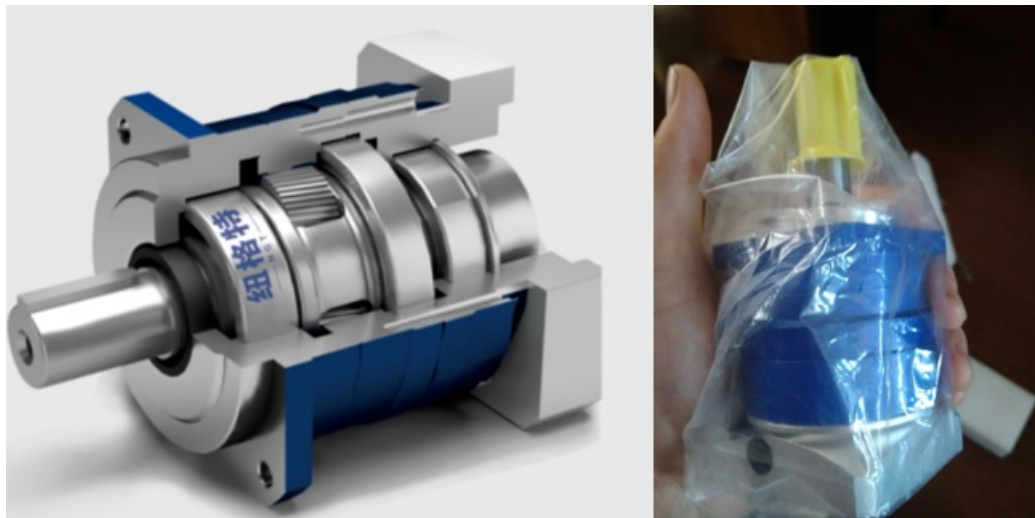


Figura 6.13: Reductora planetaria seleccionada PLM060.

Utilizando la ecuación 5.19 se obtiene que para este manipulador el *backlash* estimado del efector sería de $1,85 \cdot 10^{-4}$ [mm], los valores de inercia y *backlash* de catálogo involucrados

se encuentran en la imagen B.1 en Anexos, mientras que la tabla 6.5 contiene los valores de inercia de los eslabones. Si se considera la proyección del *backlash* de las reductoras en el efector del brazo en su máxima extensión, sin efectos inerciales, se obtiene una repetibilidad esperada de 0,9 [mm]. Como se sugiere en [14] estos valores indican un rango bastante amplio, requiriéndose pruebas para la correcta determinación de la repetibilidad. El desarrollo de [14] posee componentes similares a los seleccionados para este proyecto, por lo que junto a la información recopilada en antecedentes, se esperan resultados de repetibilidad en torno a los 20 [μm] para el manipulador desarrollado en este proyecto.

Rodamientos hombro

En la articulación del hombro se utilizan cuatro rodamientos de agujas, dos de carga radial y dos de carga axial, su disposición esquemática en el eslabón húmero se muestra con una vista en corte en la figura 6.14. Las especificaciones de estos rodamientos se sintetizan en la tabla 6.2. Se usan las ecuaciones de la sección 5.4.1, las vidas indicadas se pueden obtener con la ecuación 5.12 o utilizando el asistente de SKF en [38]. Se usan las cargas y velocidades mencionadas en la sección de simulación dinámica, además de 2500 [N] en cada rodamiento radial, ya que son las cargas radiales necesarias para mantener el equilibrio estático al realizar suma de momentos en torno al hombro. Se simplifica el cálculo utilizando la velocidad máxima de operación.

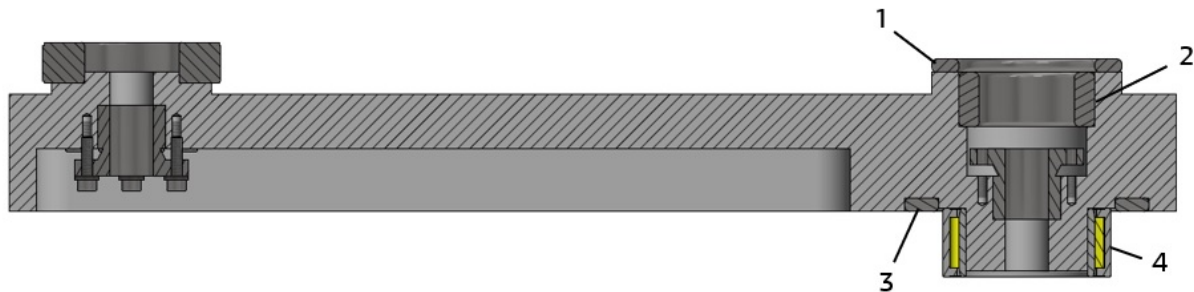


Figura 6.14: Vista lateral en corte de eslabón húmero.
 (1) AXK 50/70, (2) NKI 35/20, (3) AXK 65/90, (4) NKI 45/25.

Tabla 6.2: Valores de catálogo y vida estimada de rodamientos con confiabilidad de 90 %.

Código rodamiento	Tipo carga	Carga dinámica básica [kN]	Carga estática básica [kN]	Carga mínima [kN]	Carga [kN]	Velocidad [RPM]	Factor de seguridad estática	Vida calculada [rev]	Vida calculada [h]
NKI 35/20	Radial	29,7	60	1,83	2,68	24	22,37	3.026.859,40	2.101.985,70
NKI 45/25	Radial	42,9	91,5	1,83	2,68	24	34,12	10.311.655.506	7.160.871,80
AXK 50/70	Axial	28,5	143	0,0715	0,212	24	674,53	12.446.005.739.737	8.643.059.541,48
AXK 65/90	Axial	39	255	0,1275	0,212	24	1.202,83	35.407.545.371.030	24.588.573.174,33

Rodamiento codo

En el codo se utiliza un rodamiento de rodillos cruzados THKRU66 con el grado de precisión más alto ofrecido por catálogo (P2) presente en la imagen 6.15. La versión inmediatamente más pequeña de este rodamiento cumplía satisfactoriamente los parámetros de operación requeridos, sin embargo, presentaba un costo de sólo 10 dólares menos, por lo que se optó por el sobredimensionamiento para mejorar la confiabilidad de esta articulación.



Figura 6.15: Rodamiento de rodillos cruzados THK RU66.

Utilizando las ecuaciones de la sección 5.4.2 y los resultados de la simulación dinámica, se obtienen los resultados de la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Caracterización rodamiento THK RU66 del codo.

Característica	Valor	Unidad
Carga radial máxima	178	[N]
Carga axial máxima	168	[N]
Momento máximo	52.090	[Nmm]
Clasificación factores dinamicos	0,0956	-
Factor dinamico radial	1	-
Factor dinámico axial	0,45	-
Diámetro circunferencia rodillos	66	[mm]
Carga dinámica radial equivalente	1.832	[N]
Factor de temperatura	1	-
Factor de carga	1,5	-
Vida de servicio	478.634.525	[Rev]
Velocidad media de operación	37	[RPM]
Vida de servicio	215.601	[Horas]
Carga dinámica básica	17.500	[N]
Carga radial estática equivalente	1.830	[N]
Carga estática básica	22.300	[N]
Factor de seguridad estático	12,2	-

Tornillo de bolas

Para actuar el movimiento prismático del eje Z, se utiliza el tornillo de bolas SFE1616 de la figura 6.16, de 350 [mm] de largo, 16 [mm] de diámetro y 16 [mm] de paso, con descansos BK12 y BF12, acoplado al motor Herlea 5408 mediante un acople de 8 [mm] a 12 [mm]. Las especificaciones de este componente se sintetizan en la tabla 6.4. Los rodamientos que se incluyen con los descansos BK12 y BF12 son 6001 de bolas de contacto radial, estos se cambiaron por rodamientos 7001 de bolas de contacto angular, dado que las cargas soportadas en la configuración utilizada son tanto radiales como axiales.



Figura 6.16: Tornillo de bolas SFE1616 instalado.

Los valores de la tabla 6.4 se obtienen con las ecuaciones de la sección 5.3, considerando el valor de carga dinámica de catálogo de 719 [kgf] en B.3 en Anexos, junto con una carga sobredimensionada de 100 [N].

Tabla 6.4: Características tornillo de bolas SFE1616 seleccionado.

Característica	Valor	Unidad
Vida	3,49836E+11	Revoluciones
Carga máxima permisible	53,37	[kN]
Velocidad máxima permisible	19.510	[RPM]
Torque requerido a motor Z	0,28	[Nm]

Se nota que el torque requerido al motor Z es menor al disponible por el motor Herlea 5408, este se calcula considerando la ecuación 5.7 con una carga de 7 [kg] (considerando la

masa del eslabón Z más una carga auxiliar de 5 [kg]), aceleración en subida de 5 [m/s²] y un coeficiente de roce de 0,15.

Acoples sin chaveta

Para acoplar los ejes de 16 [mm] de salida de las reductoras planetarias a los eslabones en la articulación del hombro y del codo, se utilizaron acoples sin chaveta o *Powerlocks* marca Chaoyue modelo Z14 presentes en la figura 6.17, cuyo torque nominal de transmisión es de 74 [Nm] para diámetro interno de 16 [mm]. Este valor de catálogo se presenta en la figura B.6 en Anexos.



Figura 6.17: Acoples marca Chaoyue modelo Z14.

6.3. Análisis de elemento finito

Los análisis de elemento finito se realizaron en el entorno de análisis estático de Inventor, en base a las fuerzas y momentos máximos alcanzados sobre las articulaciones durante el ciclo de trabajo presentado en las simulaciones dinámicas. Los componentes de interés a analizar son el conjunto motriz del hombro, el eslabón húmero y el eslabón Z. Las condiciones y restricciones de estos análisis estáticos incluyen simplificaciones considerables, de manera de obtener nociones del comportamiento de los materiales en la operación del prototipo. Cada componente se modeló considerando las propiedades mecánicas del material real, mencionadas en la tabla 4.2.

Las mallas utilizadas en los análisis se basan en los parámetros sugeridos por defecto por Autodesk [39]. Se usó un tamaño medio de elemento de 0,1 veces el tamaño del modelo a

analizar, el tamaño mínimo utilizado fue de 0,2 veces el tamaño medio (para refinado automático de áreas pequeñas), factor de modificación de 1,5 (relación entre longitudes de arista máxima entre elementos adyacentes, afectando uniformidad en la transición entre mallas finas y gruesas) y un ángulo máximo de giro de 60° (afecta el número de elementos en las superficies curvas, con un valor menor se generan más elementos de malla en una curva).

6.3.1. Conjuntos motrices

En este caso se analiza el conjunto motriz del hombro, ya que es muy similar al del codo al poseer los mismos materiales y componentes, pero cuenta con un motor BLDC de mayor torque. Se realiza un análisis estático imponiendo el torque máximo que puede entregar el motor BLDC Herlea 8325, es decir, $7,21 \text{ [Nm]}$, sobre el eje de salida de este. De esta manera se puede obtener una idea del comportamiento de los espaciadores de aluminio y las placas de montaje para conectar el motor con la reductora planetaria.

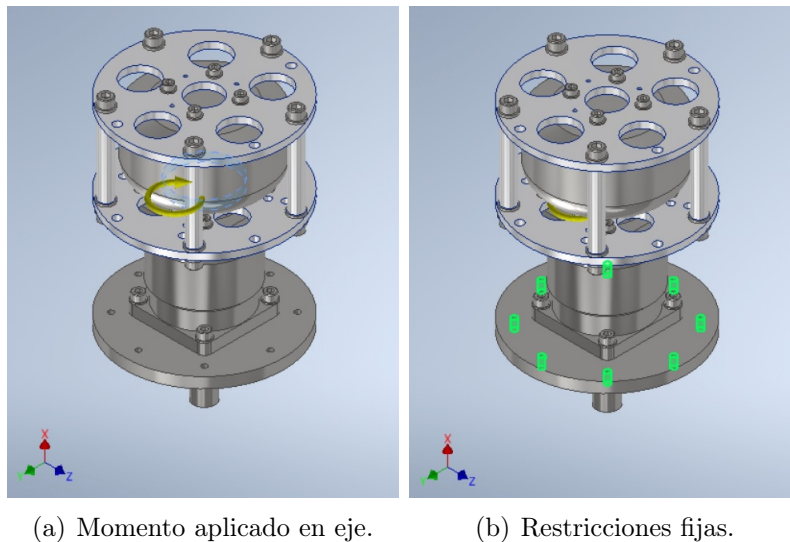
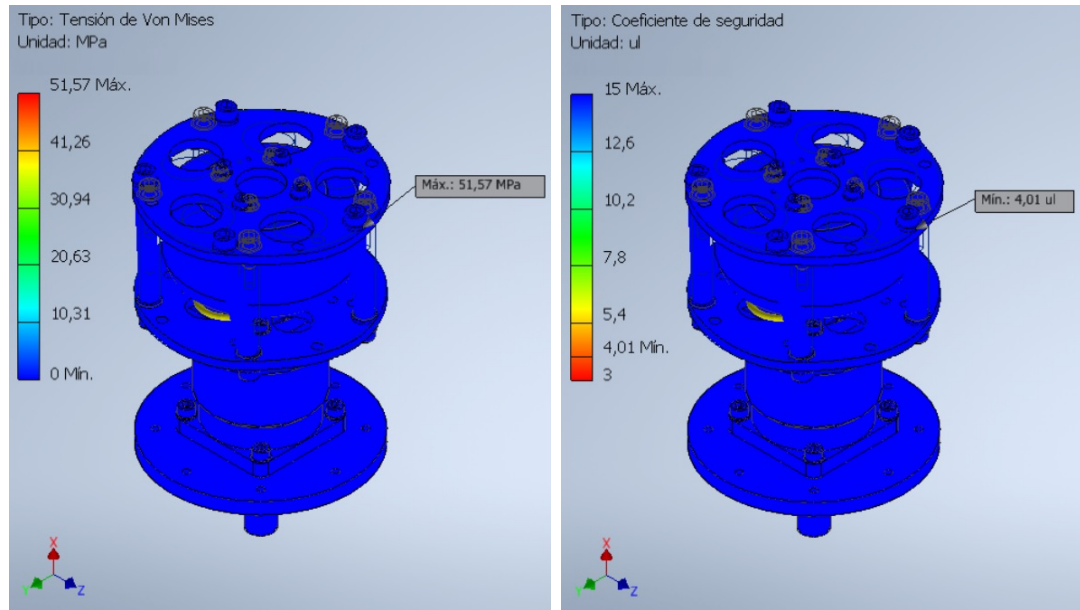


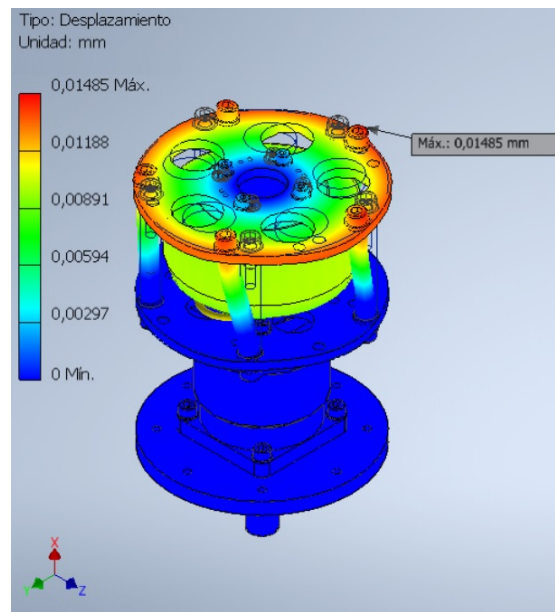
Figura 6.18: Cargas y restricciones en conjunto motriz hombro.

Se aplican restricciones fijas en las superficies cilíndricas internas de apertadura, seleccionadas en verde en la figura 6.18 (b). Como se presenta en la figura 6.19, el esfuerzo máximo de Von Mises se obtiene en las perforaciones para aperturar los espaciadores de aluminio 6063 en la placa superior de aluminio AA1100, este valor es de $51,57 \text{ [MPa]}$, lo que implica un factor de seguridad de 4 para falla en primer ciclo.



(a) Tensión de Von Mises

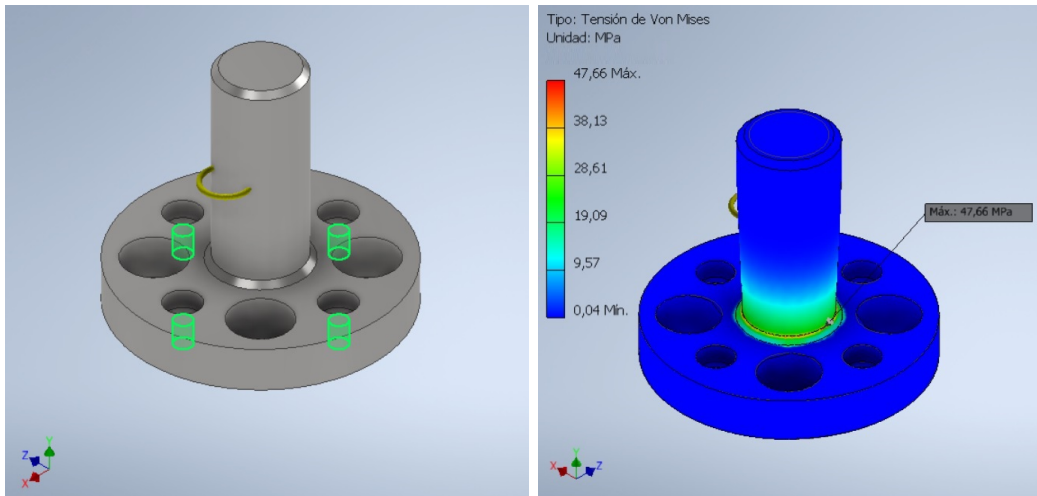
(b) Coeficientes de seguridad.



(c) Desplazamiento máximo.

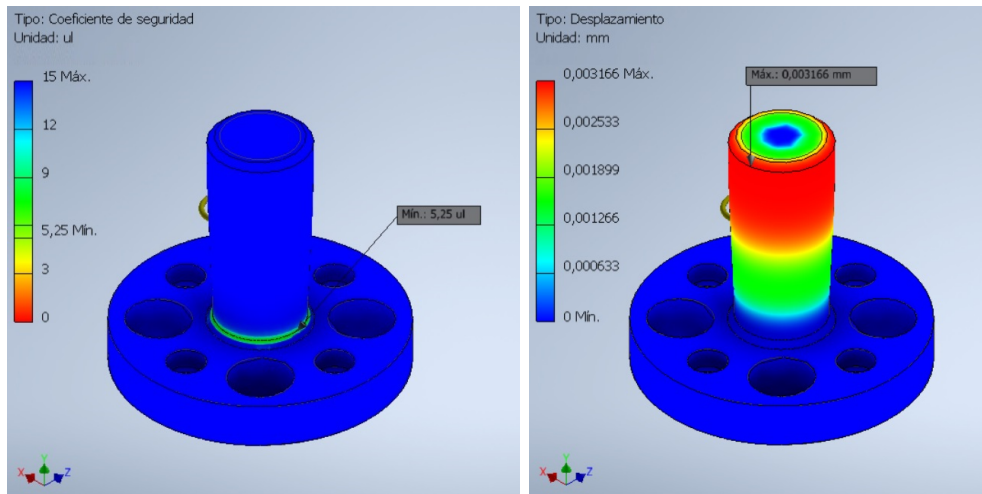
Figura 6.19: Resultados análisis estático conjunto motriz hombro.

En el caso del eje de acero SAE 1020 *output* del motor, se impuso como restricción fija las superficies cilíndricas de apertadura, con un momento de 7,21 [Nm] sobre la superficie cilíndrica del eje de salida. El esfuerzo máximo de Von Mises es de 47,66 [Mpa], lo que implica un factor de seguridad de 5,25 para falla en primer ciclo. Las dimensiones de este componente están determinadas por los diámetros del acople de entrada de las reductoras, los cuales pueden ser adquiridos en 6,35 [mm], 8 [mm] y 14 [mm]. Este análisis permitió seleccionar el diámetro de 14 [mm] ya que los otros no cumplían satisfactoriamente con soportar el torque máximo del motor.



(a) Cargas y restricciones.

(b) Tensión de Von Mises.



(c) Coeficiente de seguridad.

(d) Desplazamiento máximo.

Figura 6.20: Resultados análisis estático eje.

6.3.2. Eslabón húmero

Para analizar el comportamiento de este componente se realiza un análisis estático. Para este componente en particular se refinó la malla a elementos de 3 [mm] en las zonas de montaje de rodamientos y pernos. Se fijaron las superficies cilíndricas asociadas a la apertadura del acople sin chaveta, como se muestra en la figura 6.21 en color verde. De los resultados de la simulación dinámica y según el sistema de coordenadas de la misma figura, sobre las uniones de codo se utilizó una carga de 264 [N] en sentido positivo en X, una carga de 340 [N] en Z positivo y 168 [N] en Y negativo, además de considerar la gravedad en ese mismo sentido. También se consideraron cargas de rodamiento de 2500 [N] sobre las superficies cilíndricas donde se montan los rodamientos de agujas de carga radial en el hombro. Este valor se deduce de la sumatoria de momentos en el hombro para mantener el equilibrio estático del conjunto.

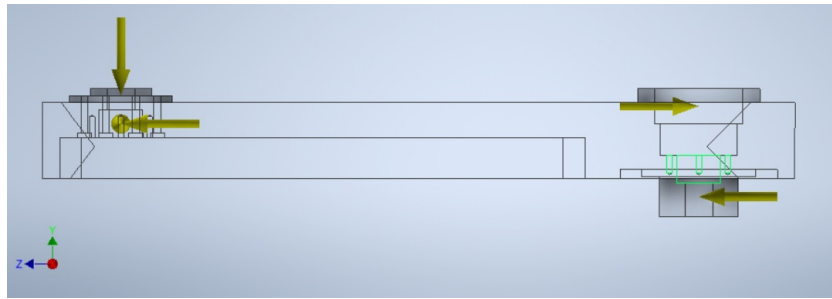
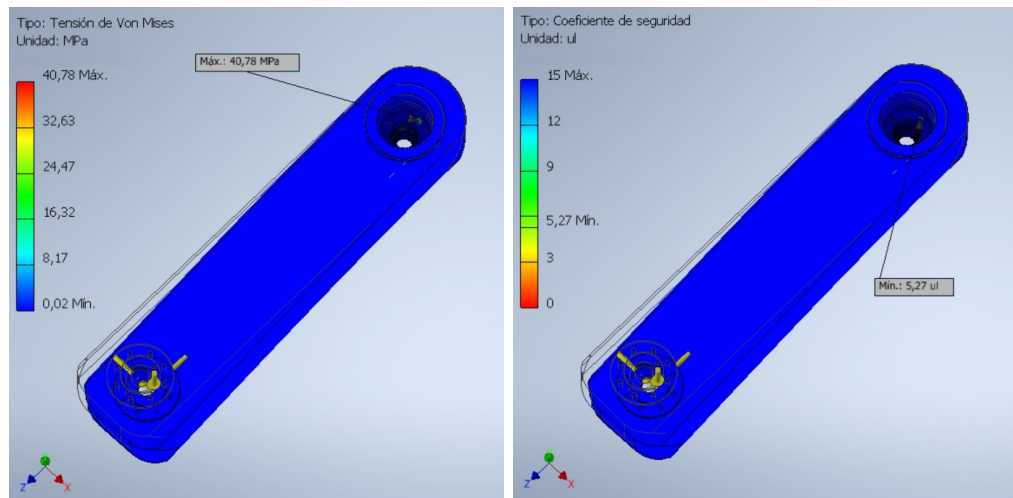
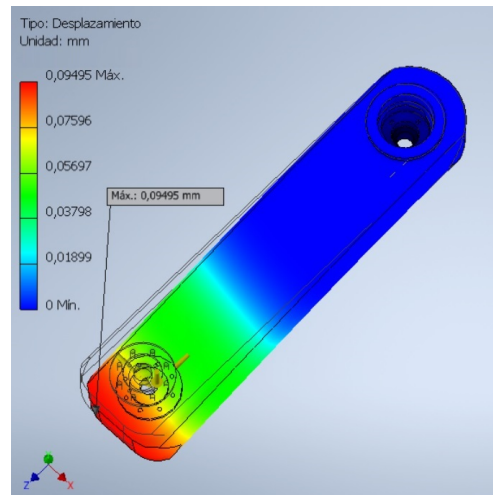


Figura 6.21: Cargas y restricciones en eslabón húmero.



(a) Tensión de Von Mises.

(b) Coeficiente de seguridad.



(c) Desplazamiento máximo.

Figura 6.22: Resultados análisis estático eje.

El esfuerzo máximo de Von Mises obtenido en el eslabón húmero fabricado en aluminio AA2017, es de 40,78 [Mpa] y se encuentra en la zona del acople sin chaveta. Este valor implica un factor de seguridad de 5,27 para falla en primer ciclo.

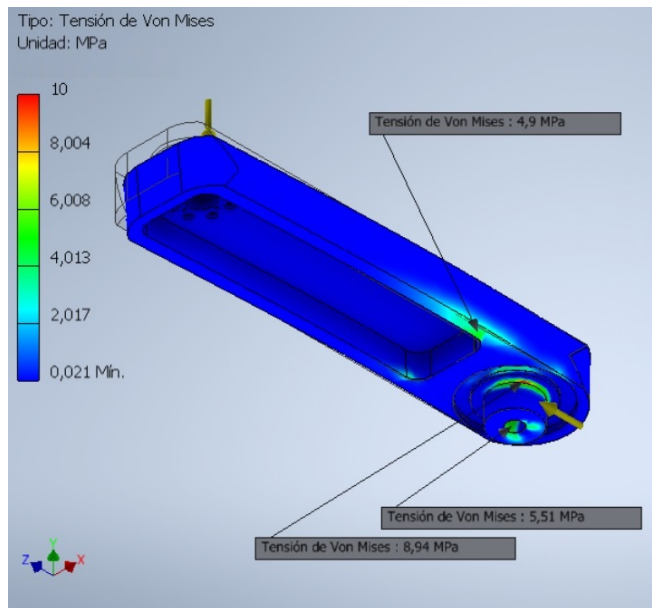


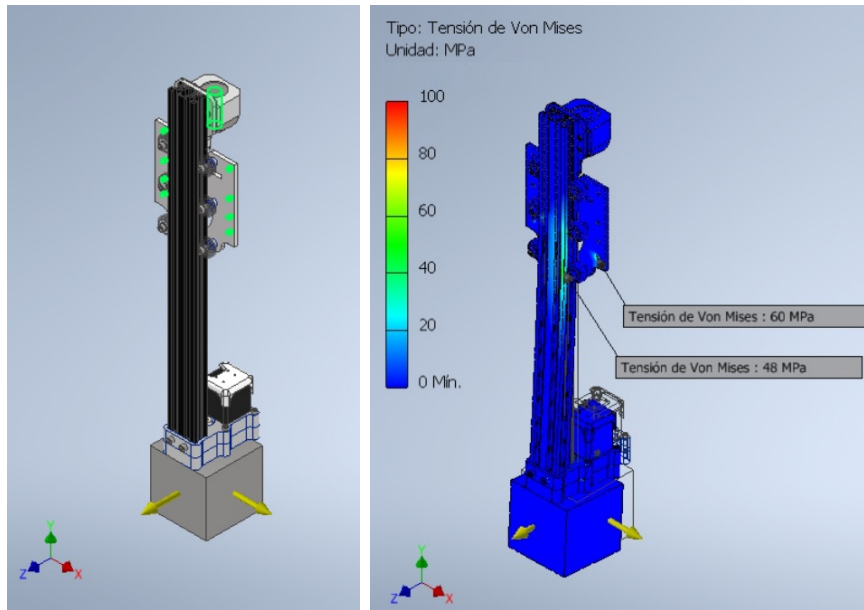
Figura 6.23: Tensión de Von Mises en parte inferior del eslabón húmero.

En la figura 6.23 se notan los esfuerzos mayores en la parte inferior del eslabon, cambiando la escala de colores para apreciar zonas críticas. Se pueden apreciar las zonas de concentración de esfuerzos, sin embargo, todas cuentan con un coeficiente de seguridad mayor a 15.

6.3.3. Eslabón Z

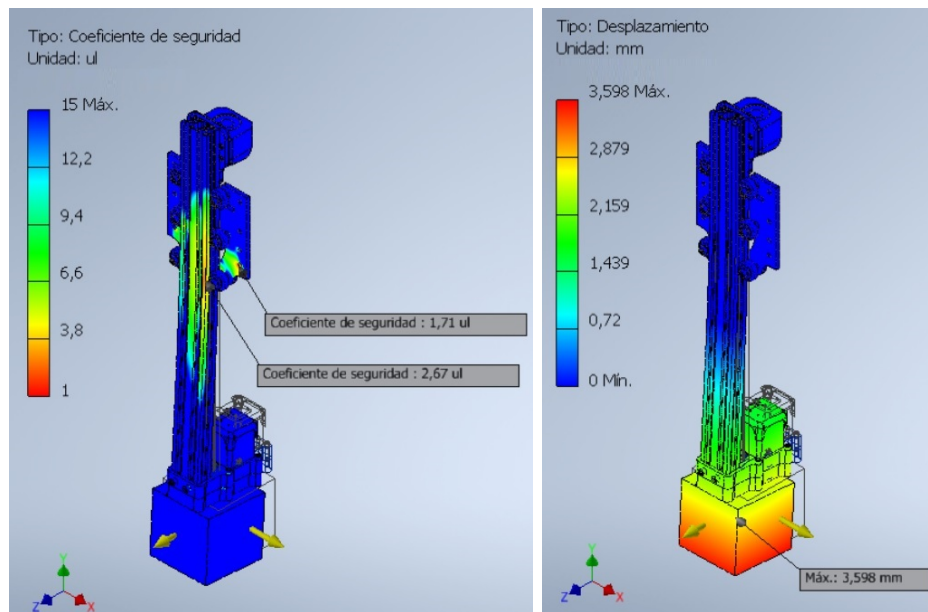
Se realiza un análisis estático del eslabón Z en altura mínima y máxima. Se aproxima como un sólido completo, incluyendo componentes de la articulación A y la carga auxiliar de 5 [kg]. Se considera de interés el comportamiento del perfil de aluminio vertical y los puntos de apenadura de la placa de aluminio AA1100 frontal. Las cargas impuestas involucradas se aproximan desde la simulación dinámica expuesta anteriormente.

Se imponen como restricciones fijas las superficies cilíndricas internas donde se apena la placa frontal de aluminio y la superficie cilíndrica interna de la tuerca del tornillo de bolas, estas se pueden ver en color verde en la figura 6.24(a). Se consideran efectos de gravedad de forma vertical con respecto al modelo, y se imponen fuerzas de 116 [N] en el eje X y 178 [N] en el eje Z actuando sobre el efector, según los vectores y sistema de refencia presentes en la figura 6.24 (a). Las restricciones y cargas son las mismas para el caso de altura máxima presente en la figura 6.25.



(a) Restricciones y cargas.

(b) Esfuerzos de Von Mises.

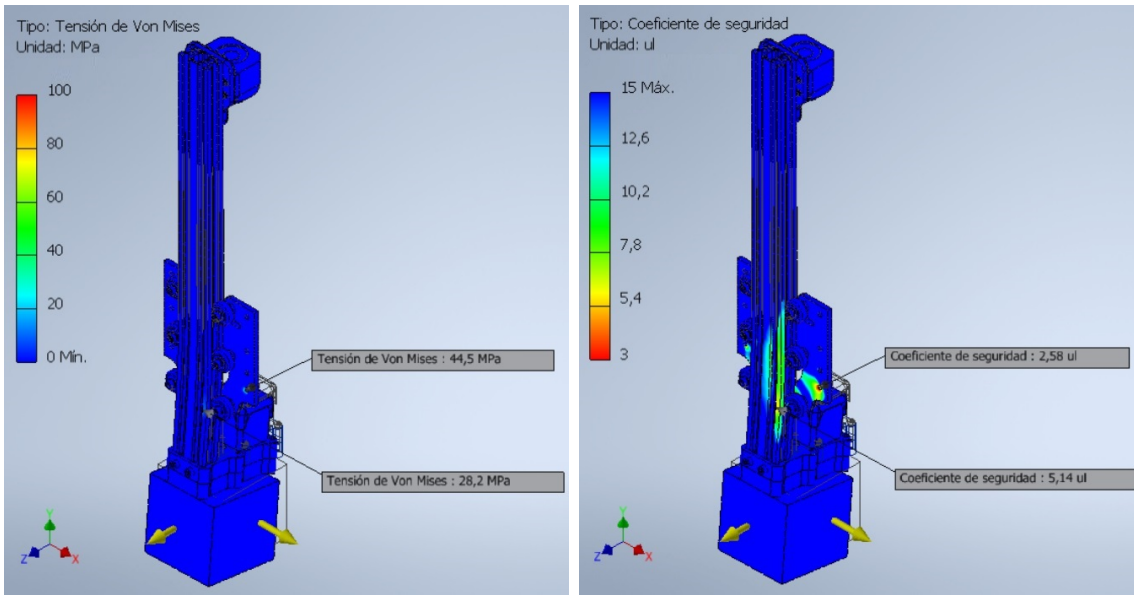


(c) Coeficientes de seguridad.

(d) Desplazamiento máximo.

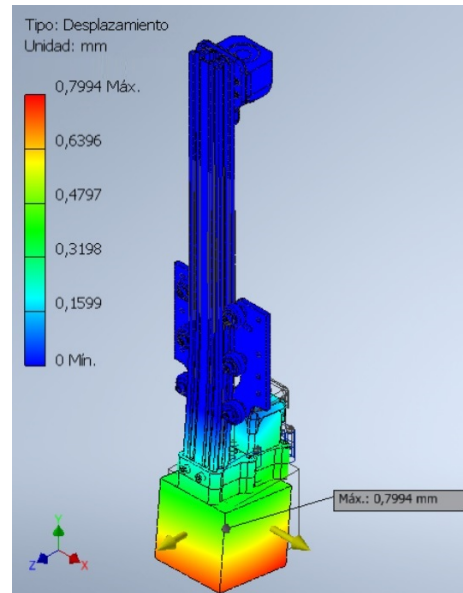
Figura 6.24: Resultados análisis estático eslabón Z en altura mínima.

El esfuerzo máximo de Von Mises obtenido en el eslabón Z, el cual consiste principalmente de un perfil V-slot de 20x40 [mm] de aluminio 6063T5, es de 48 [Mpa], lo que implica un coeficiente de seguridad de 2,67 para falla en primer ciclo. El desplazamiento máximo es de aproximadamente 3,6 [mm] en el extremo inferior del efector.



(a) Esfuerzos de Von Mises.

(b) Coeficientes de seguridad.



(c) Desplazamiento máximo.

Figura 6.25: Resultados análisis estático eslabón Z en altura máxima.

Como se presenta en la figura 6.25 el esfuerzo máximo de Von Mises obtenido en el eslabón Z en su posición de altura máxima es de 28,2 [Mpa], lo que implica un coeficiente de seguridad de 5,14 para falla en primer ciclo. El desplazamiento máximo es de aproximadamente 0,8 [mm] en el extremo inferior del efector.

En ambos casos se nota que el esfuerzo de Von Mises máximo asociado a un coeficiente de seguridad mínimo, se presenta en la placa de montaje, en una de sus perforaciones para apornadura. Esto es más considerable en el caso de Z en altura mínima, donde el coeficiente de seguridad es de 1,7.

6.4. Generación de URDF

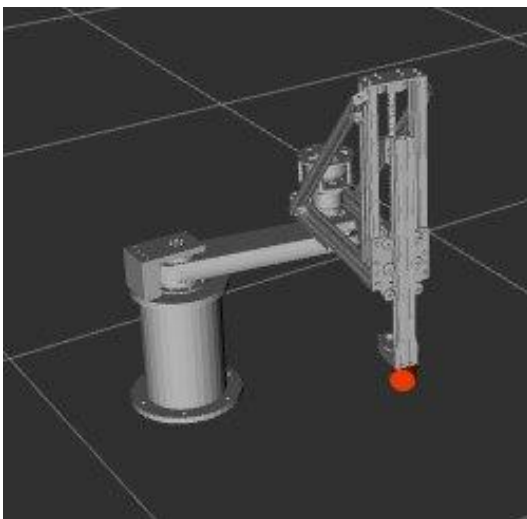
Para poder llevar el modelo de CAD a un entorno de simulación y operación del robot, se utiliza el software Solidworks para generar un URDF (*Unified Robot Description Format* o Formato Unificado de Descripción del Robot). Este formato es compatible con ROS (*Robot Operating System*), sistema operativo robótico para Linux que permite simular entornos de trabajo e integrar otras funciones como retroalimentación de sensores o visión computacional.

El diseño y ensamblaje final del SCARA se realizó en Inventor, por lo que para pasar los archivos a Solidworks, se guardó cada subensamble en formato STEP.

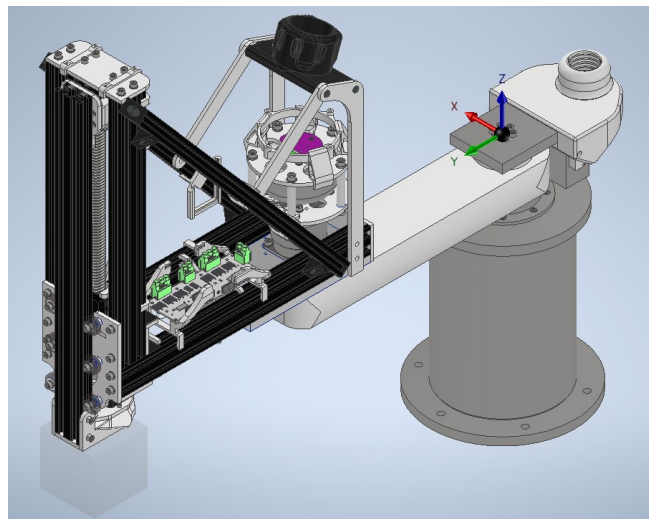
Se tuvo en cuenta la simplificación de ensamblajes, específicamente generando sólidos con ausencia de detalles como pernos y piezas accesorias de PLA.

Con los cuatro archivos de subensamble (asociados a la base, eslabón húmero, eslabón radio-cúbito, y Z), se generó un ensamblaje en Solidworks, y mediante el *add-in* facilitado por ROS para exportar URDF, se generó este último detallando articulaciones y eslabones.

El trabajo en ROS fue realizado por el memorista de ingeniería eléctrica, sin embargo, generar el URDF parte desde el diseño mecánico. Para permitir formas alternativas de generación de URDF, se facilitó los archivos de subensambles en STL, otorgando además detalles respecto a la posición de los centros de masa y momentos de inercia de cada eslabón, como se aprecia en la figura 6.27 considerando la orientación de la figura 6.26b.

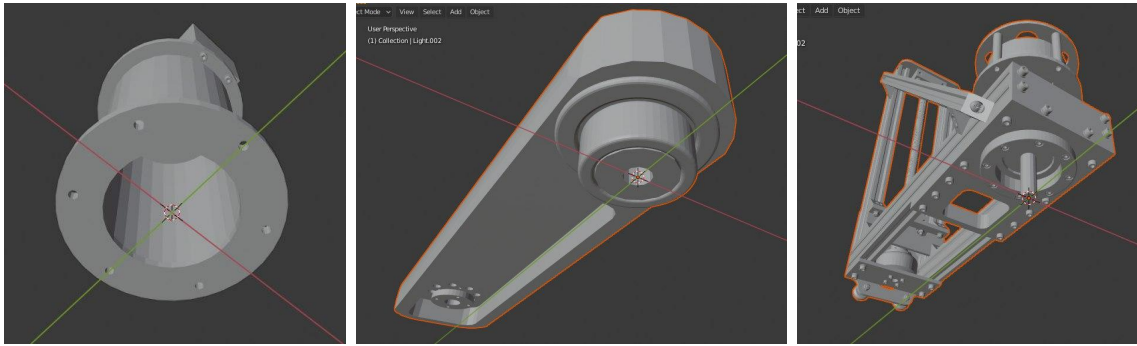


(a) SCARA en simulador Gazebo, incluido en ROS.



(b) Orientación sistemas de coordenadas.

Figura 6.26: Vistas de referencia URDF.



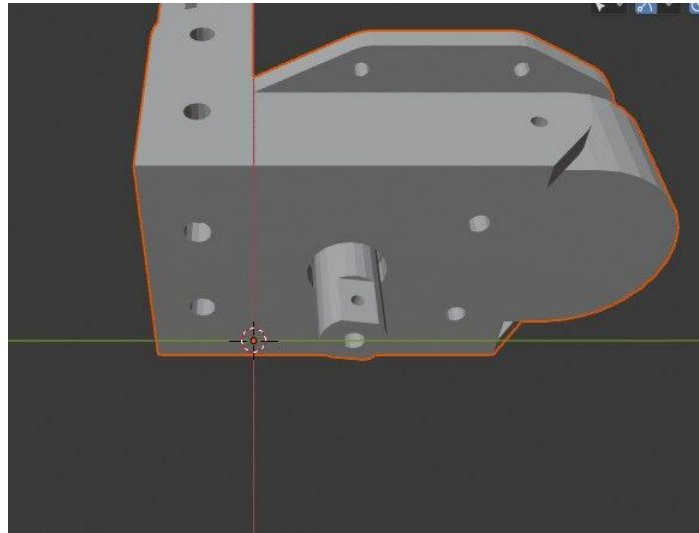
(a) Base

(b) Húmero

(c) Radio-cúbito



(d) Z-A Lateral



(e) Z-A Detalle

Figura 6.27: Puntos de referencia para posición centros de masa.

Tabla 6.5: Propiedades físicas eslabones.

Elemento	Masa [kg]	Momento inercia I_{zz} [$kg \cdot mm^2$]	Posición centro de masa [mm]		
			x	y	z
Base	16,2	103.858,09	0	-13	186,5
Húmero	4,5	86.393,03	0	140	47
Radio-cúbito	11,2	264.265,27	0	118	160,5
Zeta-A	1,8	1.505,5	0	-24	215

Capítulo 7

Construcción

En esta sección se describen de forma general los métodos de manufactura utilizados, presentando algunas imágenes. El proceso de fabricación y armado del brazo robótico tomó cuatro meses trabajando de manera no continua, principalmente por estar iterando el diseño paralelamente.

En la manufactura de componentes se utilizaron las máquinas disponibles en el taller mecánico y el Fablab de la universidad. Además, la maestría Mafem¹ colaboró con el mecanizado de algunas piezas.

¹<https://www.mafem.cl/>

7.1. Piezas externalizadas

Se trabajó junto a la maestranza Mafem para fabricar piezas en un centro de mecanizado DNM6700 con cuarto eje y en un torno CNC Puma 4100 LM con eje C, ambos marca Doosan. En la figura 7.1 se muestran las piezas fabricadas. Todas se fabrican en acero de bajo carbono SAE 1020, excepto la placa base del eslabón radio-cúbito, la cual se fabrica en aluminio 6061 T6.

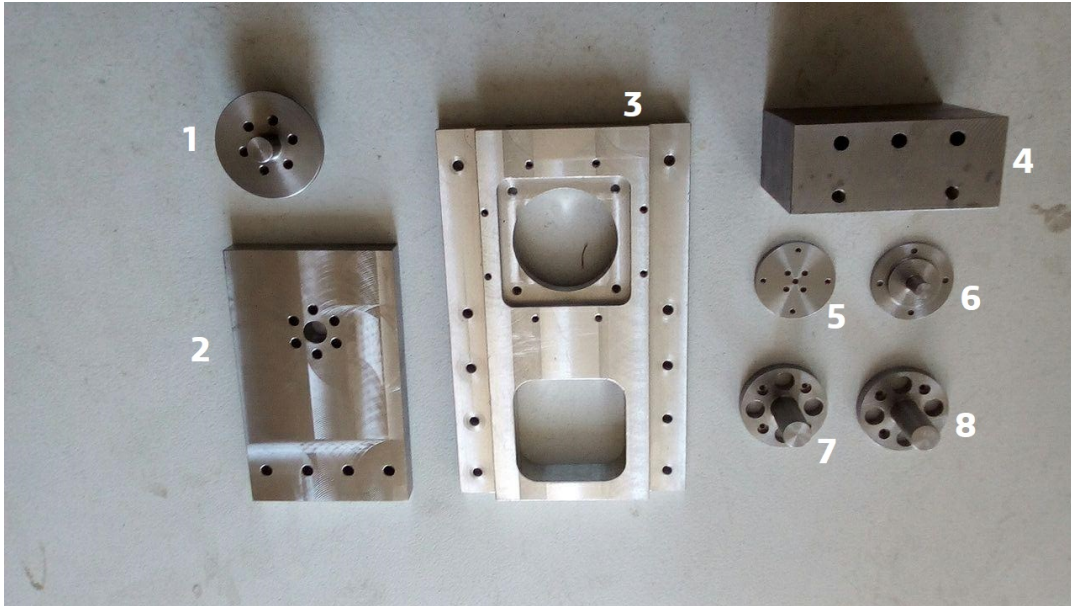


Figura 7.1: Piezas externalizadas.

- (1) Centro rodamientos superior hombro. (2) Placa porta rodamientos superior hombro. (3) Placa principal radio-cúbito, porta rodamiento codo. (4) Bloque espaciador hombro. (5) Flange de acople eje motor Z. (6) Eje de acople motor Z. (7) Eje de acople motor hombro. (8) Eje de acople motor codo.

Estas corresponden a piezas con exigencia de baja tolerancia y se presentan en la figura 7.1, especialmente las requeridas para montar los rodamientos del codo y el hombro. También los ejes necesarios para acoplar los motores BLDC a las transmisiones planetarias del codo y el hombro, y el tornillo de bolas en el eje Z.

7.2. Base

La base está compuesta de 7 partes, señaladas en la figura 7.2. Todo este subensamble está fabricado en acero de bajo carbono.



(a) Componentes.

(b) Base terminada sin placa superior.

Figura 7.2: Subensamble base.

(1) Brida inferior. (2) Cilindro intermedio. (3) Brida intermedia. (4) Placa porta rodamientos inferior. (5) Bloque espaciador. (6) Placa porta rodamientos superior. (7) Centro de rodamiento superior.

Entre los componentes número 4 y 7 se alojan dos rodamientos de agujas de carga axial y dos de carga radial, los cuales sostienen el eslabón húmero en el hombro. Los procesos involucrados en la fabricación de este subensamble son:

1. Corte plasma de plancha de 16 [mm] de espesor para aproximarse a las dimensiones de las bridas.
2. Torneado de bridas con herramientas de corte interno y externo.
3. Cilindrado de extremos de la cañería de 6 pulgadas que corresponde al cilindro intermedio.
4. Perforación de barra de acero de 130 [mm] de diámetro por 32 [mm] de alto con brocas desde 5 mm a 30 mm para aproximarse a las dimensiones de la placa porta rodamientos inferior.
5. Torneado de placa porta rodamientos inferior con herramientas de corte interno y externo.
6. Fresado con plato divisor de partones de apernadura en bridas y placa porta rodamientos inferior.
7. Soldadura MIG de bridas con cañería.

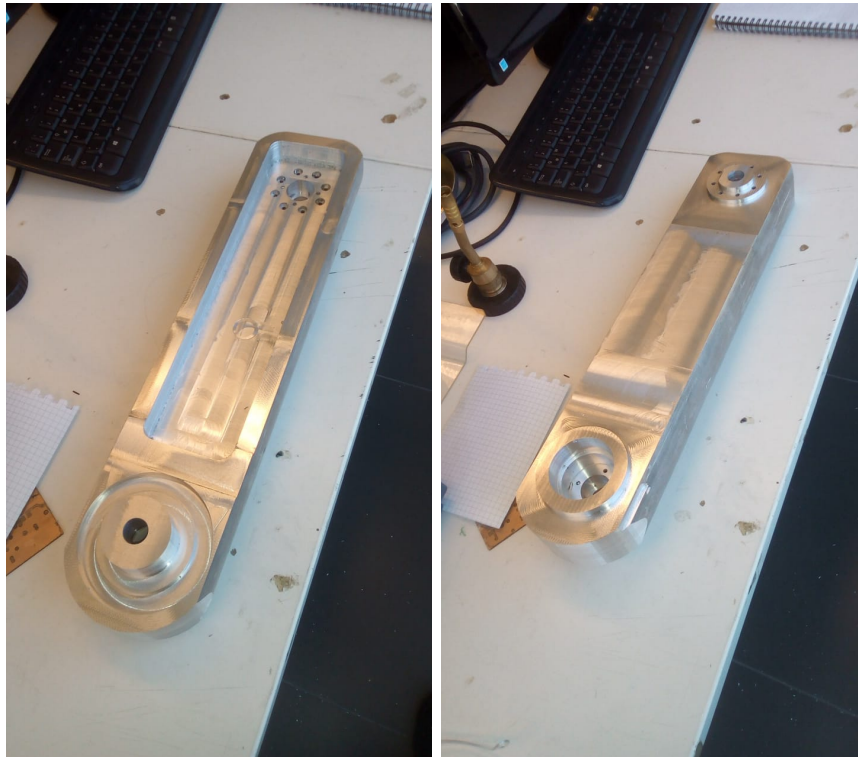
8. Para asegurar paralelismo entre bridas, se monta el conjunto nuevamente en el torno asegurando su alineamiento con un reloj comparador y refrentando la cara inferior.
9. Torneado de centro de rodamientos superior (externalizado).
10. Fresado de componentes paralelepípedos: bloque espaciador y placa superior porta rodamientos (externalizado).



Figura 7.3: Proceso fabricación base.

7.3. Eslabón húmero

Este eslabón está fabricado en base a una barra de duraluminio AA2017 de 100 [mm] de diámetro. Se adquiere la barra en 440 [mm] de largo para posteriormente mecanizarla en fresas manuales (Molina) y CNC (Tormach, Fablab).



(a) Vista inferior.

(b) Vista superior.

Figura 7.4: Eslabón húmero terminado.

Los procesos involucrados en la fabricación de este eslabón son:

1. Fresado de caras paralelas.
2. Fresado de planos intermedios.
3. Perforación de centros de articulaciones de 16 [mm] a 330 [mm] de distancia.
4. Fresado de cavidad inferior.
5. Perforación de patrón de aperturas para rodamiento de rodillos cruzados del codo.
6. Perforaciones para acoples sin claveta.
7. Fresado CNC de alojamientos para rodamientos, tomando como referencia los parámetros de corte sugeridos por NYC CNC[40].
8. Elaboración de hilos M4 para acoples sin claveta en perforaciones ciegas, con macho helicoidal.



Figura 7.5: Proceso fabricación eslabón húmero.

7.4. Eslabón radio-cúbito

El eslabón radio cúbito está fabricado de perfiles de aluminio 6063 T5 V-slot con uniones en aluminio AA1100H14 de 5 [mm] de espesor cortado con laser.



Figura 7.6: Perfiles V-slot y *hardware* para construcción de eslabón radio-cúbito.



Figura 7.7: Piezas de aluminio AA1100H14 cortadas con laser para armar eslabón radio-cúbito y conjuntos motrices.

Los procesos involucrados en la fabricación de este eslabón son:

1. Corte de perfiles V-slot a la medida requerida utilizando una ingleteadora, asegurando perpendicularidad en los cortes.
2. Recepción de piezas de aluminio 1100 cortadas con laser presentes en figura 7.7.
3. Recepción de placa base mecanizada en aluminio 6061 T6 presente en figura 7.1.
4. Ensamblaje del conjunto utilizando hardware de la figura 7.6 y escuadras para asegurar perpendicularidad.

7.5. Conjuntos motrices

Los conjuntos motrices se ensamblaron montando los motores y reductoras a placas de aluminio AA1100H14 separadas por 5 espaciadores de aluminio apertados con pernos Parker M6. Los ejes que unen el motor con la reductora tienen un diámetro de 14[mm] y se fabricaron en acero SAE 1045.



Figura 7.8: Conjuntos motrices del codo y el hombro ensamblados.

7.6. Estado actual

En las figuras 7.9, 7.10 y 7.11 se muestra el estado actual del robot. Se nota la ausencia de la carcasa, la cual se descartó por no cumplir criterios estéticos ni funcionales. Tampoco se encuentra instalada la articulación A (rotación efector), debido a que se trata de piezas de aluminio AA1100 y PLA, las cuales se busca reemplazar en el corto plazo por piezas de duraluminio. Sin embargo, se cuenta con las piezas del diseño actual de articulación A, la cual debe ser ensamblada de todas formas para la realización de pruebas en el corto plazo.

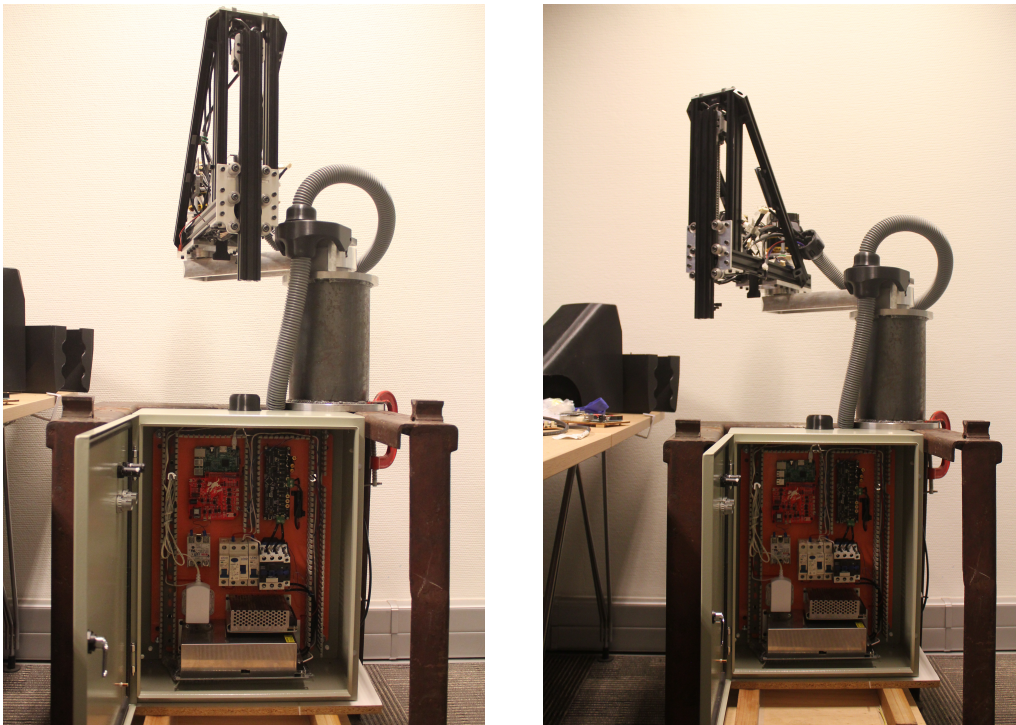


Figura 7.9: Ensamble en etapa de cableado.



Figura 7.10: Vistas ensamble con carcasa impresa en PLA.



Figura 7.11: Estado actual del manipulador SCARA.

7.7. Costo

El costo total de materiales es de aproximadamente CLP \$1.700.000. Este valor considera materiales adquiridos localmente y componentes importados desde China y Estados Unidos. Estos últimos presentaron sensibilidad al precio del dolar, el cual estuvo en significativo ascenso durante la ejecución del proyecto. La tabla 7.1 muestra un desglose de los componentes principales. La diferencia con el precio antes mencionado corresponde a componentes como pernos, cables, PLA y algunos costos de internación. Otros componentes no mencionados, principalmente hardware electrónico, como una Raspberry Pi y un motor de paso Nema 17, fueron adquiridos por pertenecer al *stock* de componentes disponibles por Beauchef Proyecto.

Debido a la disponibilidad de máquinas y técnicos por parte de la Universidad, los costos de manufactura no se incluyen en el valor expuesto anteriormente.

Tabla 7.1: Costos componentes principales.

Item	Valor	Comentario	Proveedor
Corte laser	\$168.980	Todos los componentes de aluminio AA1100, material incluido.	Sinsay
Componentes acero	\$46.792	Material base, ejes.	Aceroperfil / Otero
Barra eslabón húmero	\$76.223	Barra largo 440 mm diámetro 100 mm.	Otero
Rodamientos hombro	\$45.999	Total 4 rodamientos de agujas, 2 carga radial, 2 carga axial.	
Rodamiento codo	\$112.120	THK RU66.	Importado
Hardware radio-cúbito	\$136.839	Perfiles aluminio, ruedas, espaciadores, pernos, tuercas.	Cimech 3D
Placa base radio-cúbito	\$50.700	Aluminio 6061 200x200x25 mm.	Fabrimak
Reductor planetarias	\$291.257	Dos unidades.	Importadas
Tornillo de bolas	\$82.687	SFE1616 350 mm BK12 BF12 incluidos.	Importado
Acoples powerlock	\$30.787	Chaoyue Z14 dos unidades.	Importados
Motores	\$235.550	Herlea: 8325, 8318s, 5408.	Importados
Encoders	\$82.813	AMS - AS5047P.	Mouser
Odrive	\$241.986	Dos unidades.	Importados
Total	\$1.602.733		

7.8. Rediseños sugeridos

Lo mencionado a continuación se refiere principalmente a cambios realizables en el largo plazo, aplicables en nuevas iteraciones de construcción, o bien en intervenciones mayores del prototipo actual.

Implementación de reductora con relación mayor en hombro

El robot tiene la posibilidad de llegar a velocidades máximas similares a las de los SCARA comerciales si se cambia la reductora planetaria del hombro, a una transmisión con mayor reducción. Basándose en los resultados de torques requeridos, una relación de reducción de velocidad de 1:35 permitiría lograr torques aptos para llegar a aproximadamente 8 [m/s] en el efector. Si se tratara de una reductora planetaria, esto implicaría la necesidad de más de una etapa de reducción, aumentando el *backlash* y dificultando el uso reverso (*backdriveability*).

Mejorar acceso a conjunto motriz del hombro

Actualmente para remover el conjunto motriz del hombro es necesario remover las piezas que soportan la manguera de cables, remover la placa superior porta-rodamientos, sacar el acople sin chaveta del hombro, remover el eslabón húmero (con especial dificultad en el manejo de rodamientos), para finalmente desapernar el conjunto motriz y retirarlo por debajo. En otras palabras, el robot debe desarmarse casi en su totalidad.

Este es un error de diseño que no se contempló hasta contar con el prototipo armado, si bien previamente se analizó y repasó el procedimiento de desarmado, se consideró que era más simple de lo que resultó finalmente.

Mecánicamente es poco probable que este componente requiera desensamblarse de forma recurrente, sin embargo, resulta necesario tener acceso a sensores de temperatura y de posición para realizar *troubleshooting* en caso de fallas. En ese sentido, es pertinente la posibilidad de que el rediseño conserve la configuración actual, pero que contemple accesos a los sensores a través de la estructura de la base, sin necesidad de desensamblar el conjunto motriz.

Componente de precisión en eje Z

Para el movimiento del eje Z se utilizó un tornillo de bolas en conjunto con un perfil de aluminio V-slot de 40x20 [mm] y ruedas *delrin* (configuración utilizada en máquinas CNC de Open Builds, y en algunas impresoras 3D). Esta configuración posee baja confiabilidad en comparación a otras alternativas (como el tornillo de bolas y ranura, o al uso en conjunto de un tronillo de bolas y un eje con ranura de bolas), debido al desgaste que presentan las ruedas y el perfil de aluminio en función de su uso y exigencia. Sin embargo, se decidió utilizar por su costo accesible y facilidad de ensamblaje. Los resultados de repetibilidad y precisión hasta ahora estimados no dan cuenta de los efectos negativos mencionados respecto al perfil de aluminio, lo que sugiere que se puede aumentar la precisión en Z y en el plano horizontal. Esto puede lograrse utilizando un tornillo de bolas con ranura, de manera que la rotación y traslación del eje Z sean realizados por el mismo componente. De esta forma se eliminaría el error de inclinación asociado al montaje del eje A respecto al eje Z, y se puede aumentar la precisión al adquirir un tornillo fabricado con tolerancias más ajustadas y por ende mayor precisión y costo.

Disposición de espaciadores excéntricos en ruedas de delrin en placa frontal

En el diseño actual, los espaciadores excéntricos están puestos en la misma columna, de manera que al ajustarse, la presión se aplica y regula desde un lado del perfil de aluminio. Esto hasta el momento ha generado dificultad al momento de ajustar parejamente la fuerza con que las ruedas presionan el perfil de aluminio. En algunas impresoras 3D donde se utilizan perfiles v-slot con 6 ruedas *delrin* para el movimiento del eje Y, se disponen los espaciadores

excéntricos de forma alternada, es decir, en un lado dos espaciadores excéntricos en los extremos con un espaciador normal en el centro, y en el otro lado, dos espaciadores normales en los extremos con un espaciador excéntrico en el centro. Esto podría ayudar al montaje del perfil de aluminio entre las ruedas, con presión pareja por parte de cada una de las ruedas.

Implementación de freno

Para operar el robot a altas velocidades, es necesario compensar el torque negativo requerido en las articulaciones. El freno regenerativo eléctrico proporcionado por los motores BLDC y el Odrive, disipan la corriente en forma de energía térmica a través de una resistencia. Esto funciona bien en un rango acotado de velocidad máxima aún no determinado. Por seguridad y para conseguir mejores prestaciones del robot, se recomienda implementar frenos electromecánicos en los actuadores, o bien, diseños mecánicos más simples como frenos de banda.

Capítulo 8

Conclusiones

8.1. Según objetivos

8.1.1. Requerimientos de diseño

Los requerimientos de diseño definidos en un comienzo y basados en necesidades de una pequeña empresa local, fueron una guía realista para analizar el mercado de robots SCARA disponibles y sus prestaciones.

Existe una amplia serie de criterios a evaluar en el desarrollo en corto plazo de un prototipo funcional. En ese sentido es importante dar prioridad a ciertos parámetros de diseño, como en este caso fue la repetibilidad (asociada al *backlash* en las articulaciones) y la capacidad de poder mover el robot con facilidad para poder programarlo físicamente (asociado a una baja relación de reducción en las transmisiones de las articulaciones). Esta priorización permitió que no fuera necesario corregir la reducción del hombro (calculada erróneamente en un comienzo) dado que cumple con los criterios mencionados, sin embargo, sacrificando velocidad máxima de operación.

8.1.2. Diseño para la manufactura y confiabilidad

El costo de este proyecto no incluyó las horas de mecanizado. Sin embargo resulta crucial y determinante considerarlo en la etapa de diseño, de manera que las piezas estén pensadas para fabricarse con el mínimo de horas de máquinas, previendo problemas y facilitando su manufactura.

En el caso particular del **eslabón húmero**, se notó durante la fabricación que la utilización de una barra cilíndrica de duraluminio implicó más tiempo del presupuestado originalmente. Esto debe abordarse en las siguientes iteraciones de construcción de este robot, considerando el uso de barras rectangulares de aluminio, o bien rediseñando el eslabón, dividiéndolo en subensambles de menor complejidad de fabricación, por ejemplo, con porta rodamientos

torneados para el hombro y el codo, unidos por perfiles de aluminio.

Para las partes de aluminio AA1100 de 5 [mm] de espesor, el uso de corte laser resultó rápido, con un costo de CLP \$169.000 por todas las piezas con material incluido. Algunos componentes requirieron post procesado, por lo que se corrigió las dimensiones de las perforaciones en los planos, aumentando las dimensiones de perforaciones circulares y cuadradas en 0,2 [mm].

La selección de componentes de transmisión de potencia y rodamientos, se basa en la vida que se requiere del componente. La definición de ciclos de trabajo varía según las aplicaciones que realizará el robot, sin embargo, es coherente evaluar la vida para las condiciones de mayor exigencia.

Para lograr acercarse a la vida señalada en los catálogos de componentes, se debe procurar instalarlos de forma correcta, respetando procedimientos y tolerancias indicadas por el fabricante.

Al priorizar cumplir con una fabricación temprana del prototipo, se optó por permitir el sobredimensionamiento de la articulación del hombro. Bajo ese criterio, se buscó la configuración de rodamientos más grandes que calzaran en las dimensiones disponibles en el volumen mecanizable para alojar rodamientos en la barra de duraluminio de 4 pulgadas, chequeando posteriormente que soportaran las cargas involucradas en una vida aceptable. Se comprobó el sobredimensionamiento obteniendo una vida de operación considerablemente mayor a la requerida (20.000 horas) con confiabilidad del 90 %. Esto sugiere a la vez que la vida de 20.000 horas se puede lograr confiabilidad mayor al 90 %. Este enfoque puede resultar en un eventual aumento de costos, por lo que debe contemplar que la selección no eleva considerablemente el presupuesto. En este caso, los precios de los rodamientos se mantuvieron en el rango admisible. Por otro lado, al sobredimensionar rodamientos se debe contemplar que se cumpla la carga mínima de operación, de manera que se evite el deslizamiento de rodillos (en vez de rodadura), el cual es causa de fallas prematuras.

8.1.3. Selección de componentes y personalización

La selección de la reductora del hombro está subdimensionada si se quisiera llegar las velocidades máximas típicas de brazos SCARA comerciales (alrededor de 8 [m/s] en el plano horizontal).

La modularidad del diseño permite cambiar este componente a futuro si se requiere operar a mayores velocidades, sin embargo, se debe contemplar la implementación de frenos en las articulaciones.

Según los resultados obtenidos de los análisis de elemento finito del eslabón Z, se observa que la placa frontal de aluminio AA1100 soporta satisfactoriamente los esfuerzos máximos en condiciones de operación, sin embargo, el coeficiente de seguridad en ciertos puntos de apertadura es relativamente bajo, por lo que el aluminio utilizado en este componente podría cambiarse por acero u otra aleación de aluminio con mayor esfuerzo de fluencia.

El resto de materiales y componentes muestran factores de seguridad estáticos altos, respaldando que el prototipo construido es capaz de soportar las cargas de operación para las que fue diseñado.

8.1.4. Construcción y pruebas

Se valida la importancia de realizar un buen ensamblaje de componentes en la etapa de diseño en CAD, revisando minuciosamente las interferencias, holguras y tolerancias. Con esto se reducen las iteraciones físicas, gasto de tiempo y materiales.

El correcto uso de las tolerancias dimensionales, más su correcta determinación en el diseño, permitió que al momento de ensamblar los componentes calzaran de la manera esperada, sin tener que rehacer o reacondicionar piezas.

El tiempo de construcción de aproximadamente 4 meses se debe a un proceso no continuo, concurrente con el diseño. Este tiempo se podría reducir considerablemente en siguientes iteraciones, siempre que los rediseños estén antes de comenzar la construcción.

La realización de pruebas de repetibilidad y velocidad en el prototipo actual no ha sido posible a la fecha. Sin embargo, el robot se encuentra armado completamente, incluyendo la instalación eléctrica de motores, sensores y placas de control, permitiendo la realización de estas en el corto plazo.

8.2. Generales

Prototipo funcional

El prototipo desarrollado corresponde a una primera iteración de un robot de hardware abierto, desarrollado en torno a requerimientos de diseño específicos, en un tiempo limitado, por lo que se abre la posibilidad de mejoras y modificaciones.

Se destaca la oportunidad de utilizar esta unidad como académica, dejándola disponible para implementar distintas estrategias de control o para simular procesos productivos de pequeña escala, o bien, para trabajar en hardware complementario como en el diseño de efectores.

Dentro de lo observado en los análisis de elemento finito del eslabón Z, el desplazamiento máximo asociado a deflexión en condiciones críticas de operación con altura mínima del efector, es de aproximadamente 3,6 [mm], lo que resulta un valor elevado y no deseable. Esto sugiere que para evitar este tipo de desplazamientos, el robot debe operar sus movimientos laterales con el efector en altura máxima, cuando se opere con alta carga y velocidad.

Trabajo futuro

Las actividades mencionadas a continuación representan tareas realizables en el robot al corto plazo. Las sugerencias de trabajo a largo plazo se presentaron en la sección 7.8.

Fabricación mesa

La mesa de montaje del robot no ha podido finalizarse a la fecha. Se cuenta con una estructura de acero, a la cual le falta una plancha de acero soldada, donde se aperne el SCARA. Se propone adquirir una plancha de 600x300 [mm] y 12 mm de espesor con una perforación de 140 [mm] la cual debe realizar perforaciones para pernos de 10 [mm], refrentarse y rectificarse en la superficie de contacto con el robot. Además se debe considerar un sistema de patas con ajuste para nivelar el conjunto, además de puntos de anclaje y/o contrapesos que permitan su estabilidad.

Fabricación articulación A en Aluminio 6061

La articulación A se encuentra actualmente desensamblada. Se compone de partes de PLA y aluminio AA1100 en 5 [mm] de espesor.

Se rediseñó esta articulación en función del material disponible, sobrante del utilizado para fabricar la base del eslabón radio-cúbito. Se busca fabricar este nuevo diseño, mecanizando dos trozos de aluminio de 100x70x25 [mm]. Como se aprecia en la figura 8.1, el ensamble se realiza con 4 pernos parker M4x20 más dos M5x16 y dos M5x10 para apernarse al perfil de aluminio con movimiento prismático en Z, mediante tuercas y los hilos presentes en extremo inferior.

Pruebas y calibración

Es necesario realizar pruebas de repetibilidad y precisión según la norma ISO 9283. Esto permitirá validar el diseño y las estimaciones realizadas en este trabajo.

Las deflexiones y tolerancias acumuladas en el proceso de fabricación y ensamble de los eslabones, sugieren que los ejes de las articulaciones pueden no encontrarse completamente paralelos en la práctica. Es necesario determinar estos errores e integrarlos en el modelo cinemático del robot, realizando una correcta calibración de este, ajustando los parámetros de Denavit Hartenberg del modelo para representar la realidad del ensamble fabricado.

Pintura

Es posible que el prototipo funcional requiera ser desensamblado completamente en el tiempo próximo, para reconfigurar el cableado del conjunto motriz del hombro.

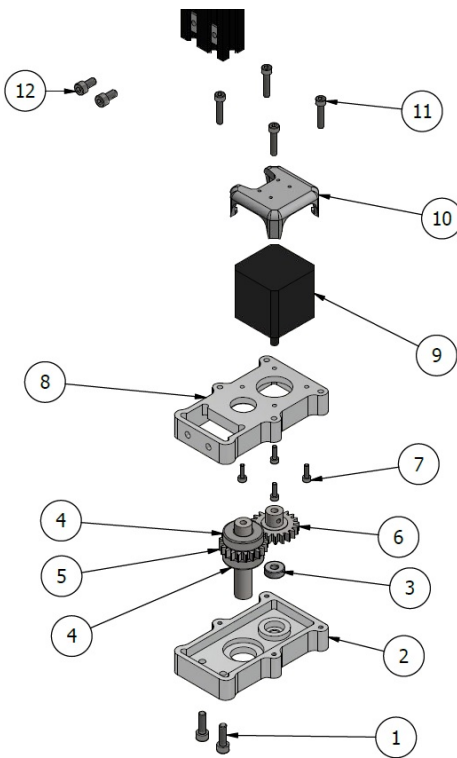


Figura 8.1: Despiece articulación A rediseñada.

(1) Pernos Parker M5x16, (2) Bloque aluminio inferior, (3) Rodamiento de bolas de carga radial 605ZZ, (4) Rodamiento de bolas de contacto angular 7001, (5) Eje de 12 [mm] con engranaje módulo 1,5 y 20 dientes, (6) Engranaje módulo 1,5 y 20 dientes con acople a 5 mm integrado, (7) Pernos Parker M3x10, (8) Bloque aluminio superior, (9) Motor Stepper Nema 17, (10) Porta encoder impreso en PLA, (11) Pernos Parker M4x20, (12) Pernos Parker M5x10.

Aprovechando el desensamblado de eslabones, para dar una estética más profesional al SCARA se puede realizar la pintura de la base de acero. La cañería que une las bridas presenta óxido en su superficie, lo que no es deseable considerando que puede afectar negativamente componentes mecánicos y así la vida del robot.

Modificar piezas porta rodamientos para lubricación y facilitar desensamble

Aprovechando la misma instancia de desensamblado recién mencionada, se puede modificar las piezas que alojan rodamientos con perforaciones que permitan lubricarlos sin necesidad de desensamblar nada.

Carcasa

La carcasa conformada por 3 piezas impresas en PLA dió una buena idea de las dimensiones del robot terminado, sin embargo, como primera iteración no se considera satisfactoria ni

definitiva. Esto debido a que las uniones no presentan un ajuste sellado, además, el carácter anisotrópico que otorgan las capas de deposición fundida, generan que la carcasa sea frágil y poco confiable, es decir, no cumple criterios de funcionalidad ni estéticos. Se sugiere iterar la carcasa del último eslabón de este SCARA utilizando termoformado o plegado de acero de bajo espesor (poniendo especial atención al peso que implica esta última opción).

Conclusiones personales

El trabajo realizado junto a Beauchef Proyecta permitió el cumplimiento de objetivos personales relacionados con el aprendizaje de diseño y fabricación digital, utilizando máquinas CNC y manuales del FabLab y el taller mecánico de la universidad, trabajando materiales de calidad industrial como aluminio y acero. Estos conocimientos dan una perspectiva real de las capacidades de prototipado con recursos a nivel profesional, lo que genera motivación para involucrarse en trabajos de innovación a nivel local, especialmente en el desarrollo de hardware y máquinas que puedan servir en las vías de implementación de un sistema socioeconómico basado en economía circular, de la mano de la manufactura distribuida y la cultura “Open Source”.

El trabajo multidisciplinario junto a Felipe Guajardo (memorista de ingeniería eléctrica), demostró los beneficios y capacidades aumentadas que pueden lograrse al colaborar entre departamentos a nivel facultad. Los conocimientos específicos de cada carrera permitieron desglosar el trabajo de manera que se lograra el objetivo de construcción dentro de las expectativas. La comunicación expedita y trabajo presencial en conjunto fueron claves para que el proyecto pudiera concretarse y a la vez disfrutar el proceso.

Bibliografía

- [1] Erik Oberg. *Machinery's Handbook 29th Edition*. Industrial Press, 29th edition, 2012.
- [2] International Federation of Robotics. *World Robotics 2019 Industrial Robots Chapter 1*, 2019 (Consultado junio 2020). https://ifr.org/downloads/press2018/WR%20Industrial%20Robots%202019_Chapter_1.pdf.
- [3] Toshiba Corporation Fujitsu Limited. *SCARA robot Selective Compliance Assembly Robot Arm*, (Consultado mayo 2019). http://rraj.rsj-web.org/en_atcl/842.
- [4] Fanuc. *Fanuc SCARA robot SR-6iA*, 2019 (Consultado junio 2019). <https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%C3%A1gina-filtro-robots/scara-series/scara-sr-6ia>.
- [5] Denso robotics. *Four axis SCARA robot HSR series*, 2019 (Consultado junio 2019). <http://densorobotics.com/products/hsr-series>.
- [6] Yamaha. *Yamaha YK700XGS wall-mount/inverse type*, (Consultado junio 2019). https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/ykxg/hang_inverse/pdf/index/yk700xgs.pdf.
- [7] Toshiba Machine. *Toshiba Machine SCARA robot series new lite models THL Series Datasheet*.
- [8] Claudio Urrea, Juan Cortés, and José Pascal. Design, construction and control of a scara manipulator with 6 degrees of freedom. *Journal of applied research and technology*, 14(6):396–404, 2016.
- [9] Morteza Shariatee, Alireza Akbarzadeh, Ali Mousavi, and Salman Alimardani. Design of an economical scara robot for industrial applications. In *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, pages 534–539. IEEE, 2014.
- [10] Darina Kumičáková, Vladimír Tlach, and Miroslav Císar. Testing the performance characteristics of manipulating industrial robots. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, 62:39–50, 09 2016.
- [11] Apex Dynamics. *Introducción a reductores planetarios*, (Consultado junio 2020). <https://www.apexdyna.nl/en/planetary-gearbox-introduction/>.

- [12] Ali Mousavi, Alireza Akbarzadeh, Morteza Shariatee, and Salman Alimardani. Design and construction of a linear-rotary joint for robotics applications. In *2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, pages 229–233. IEEE, 2015.
- [13] Joseph Edward Shigley Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. *Diseno en ingenieria mecanica de Shigley*. McGrawhill, 9na edition, 2008.
- [14] Ali Mousavi, Alireza Akbarzadeh, Morteza Shariatee, and Salman Alimardani. Repeatability analysis of a scara robot with planetary gearbox. In *2015 3rd RSI international conference on robotics and mechatronics (ICROM)*, pages 640–644. IEEE, 2015.
- [15] Apex Dynamics. *AE series specifications*, (Consultado junio 2019). http://www.apexdynamicsusa.com/lanotattachments/download/file/id/43/store/1/ae_specifications.pdf.
- [16] Wolf-Dieter Lukas Wolfgang Wahlster, Henning Kagermann. *Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur vierten industriellen Revolution*, 2011 (Consultado junio 2019). http://www.wolfgang-wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/Industrie_4_0_Mit_dem_Internet_der_Dinge_auf_dem_Weg_zur_vierten_industriellen_Revolution_2.pdf.
- [17] Cámara de Comercio de Santiago PMG. *Índice de Transformación Digital de empresas 2020*, 2020 (Consultado Marzo 2020). https://www.ecommerceccs.cl/wp-content/uploads/2020/04/%C3%8Dndice-de-Transformaci%C3%B3n-Digital-2020_CCS_PMG_Corfo.pdf.
- [18] International Federation of robotics. *Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots*, (Consultado junio 2020). <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive%20Summary%20WR%202019%20Industrial%20Robots.pdf>.
- [19] Robótica Universidad de Chile. *Reporte Técnico CR-01, Catastro de empresas y organizaciones de robótica en Chile*, (Consultado junio 2020). https://docs.google.com/document/d/1xZeGvvYydxD0tjXPoWTcIg1-umOIknFOYHT86tc6FvM/edit?fbclid=IwAR1q1Vefad0JOV40kfJCNWEetw9XwYQ9TrsUr8BcKYWQ_D6T75ayPbzqzSI.
- [20] Rexroth Bosch Group. *How “LOSTPED” Can Help With Sizing and Selecting Linear Motion Systems*, 2006 (Consultado junio 2019). https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/assembly_technology_/pdfs/Bosch_Rexroth_LOSTPED_Paper.pdf.
- [21] Open Builds. (Consultado junio 2019). <https://openbuilds.com/>.
- [22] Annin robotics. *AR3 6 axis robot*, (Consultado junio 2019). <https://www.anninrobotics.com/>.
- [23] Evezor. *Evezor Open Source Robotic Arm*, (Consultado junio 2019). <https://vezor.com/>.

- [24] Khairul Salleh Mohamed Sahari, Khor Hong Weng, Yap Wee Han, Adzly Anuar, Mohd Zafri Baharuddin, and Syed Sulaiman Kaja Mohideen. Design and development of a 4-dof scara robot for educational purposes. *Jurnal Teknologi*, 54(1):193–215, 2011.
- [25] BSKK Ibrahim and Ahmed MA Zargoun. Modelling and control of scara manipulator. *Procedia Computer Science*, 42:106–113, 2014.
- [26] Luigi Villani Giuseppe Oriolo (auth.) Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer-Verlag London, 1 edition, 2009.
- [27] M. Vidyasagar Mark W. Spong, Seth Hutchinson. *Robot Modeling and Control*. John Wiley Sons Inc, 2 edition, 2020.
- [28] Parker. *Linear and Rotary Positioning Stages Engineering Reference*, (Consultado Junio 2020). <http://www.parkermotion.com/engineeringcorner/linearmechanics.html#sigma>.
- [29] Teknic. *ClearPath integrated servo motors*, (Consultado junio 2020). <https://www.teknic.com/products/clearpath-brushless-dc-servo-motors/>.
- [30] Oskar Weigl. *Hobby Motors For Robotics*, 2019 (Consultado junio 2019). <https://odriverobotics.com/>.
- [31] Kamal Youcef-Toumi Haruhiko Asada. *Direct-Drive Robots: Theory and Practice*. The MIT Press, 1987.
- [32] THK. *Cross-Roller Ring Series, catálogo No382-3E*.
- [33] DRE Engineering. *Preload Cross Roller Bearing*, (Consultado marzo 2020). http://www.dlrtr.com/Preload-Cross-Roller-Bearings_c244.
- [34] Tsubaki. *Tsubaki Power-Lock*, (Consultado septiembre 2019). https://www.ustsubaki.com/pdf/10930000_power_lock_catalog.pdf.
- [35] THK. *Husillos de bolas, catálogo general*, (Consultado Junio 2020). https://tech.thk.com/es/products/pdf_download.php?file=511LS_15_BallScrew.pdf.
- [36] HIWIN. *Ballscrews Technical Information, catálogo S99TE20-1610*.
- [37] SKF. *Catálogo rodamientos SKF*, 2018 (Consultado septiembre 2019). https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings---17000_1-EN_tcm_12-121486.pdf.
- [38] SKF. *Asistente para selección de rodamientos SKF*, (Consultado septiembre 2019). <https://skfbearingselect.com/#/bearing-selection-start>.
- [39] Autodesk. *Ajuste de la configuración y los controles de malla*, (Consultado junio 2020). <https://knowledge.autodesk.com/es/support/inventor/>

learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ESP/Inventor-Help/files/
GUID-B73B2C75-4AA4-4F9E-9BC4-4AB8D26C1765-htm.html.

- [40] NYC CNC. *Speeds and Feeds Worksheet*, (Consultado diciembre 2019). <https://www.nycnc.com/nyc-cnc-documents/>.
- [41] Indura. *Manual de soldadura Indura. Pag.87*, 2019 (Consultado septiembre 2019). <http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Soldadura%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2F00da6ac5e6754e428ecd94f1c78711cb.pdf>.
- [42] Shibaura Machine. *SCARA Robot THE600*, (Consultado junio 2019). <https://www.shibaura-machine.co.jp/en/product/robot/lineup/th/THE600.html>.
- [43] Marek PłAczek and Łukasz Piszczek. Testing of an industrial robot's accuracy and repeatability in off and online environment. *Eksploatacja i Niezawodność*, 20:455–464, 2018.
- [44] David Ullman. *The Mechanical Design Process, Fourth Edition (Mcgraw-Hill Series in Mechanical Engineering)*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 4 edition, 2010.

ANEXOS

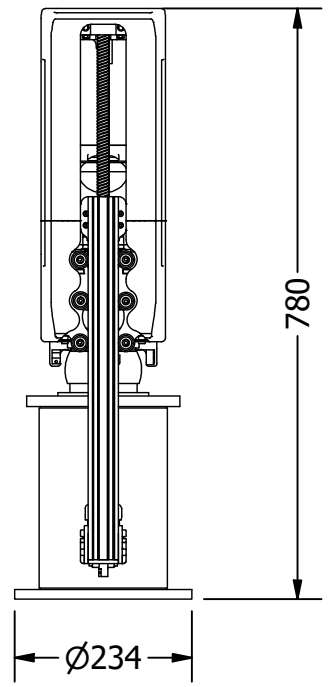
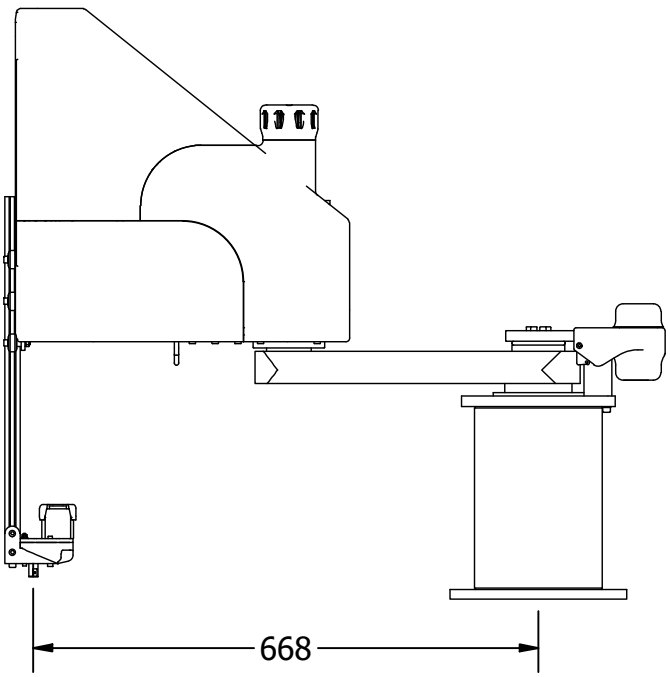
Anexo A

Planos

2

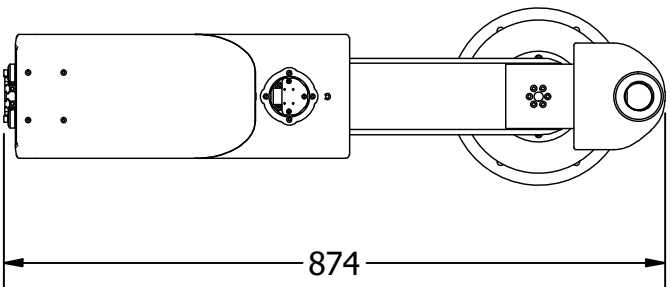


1



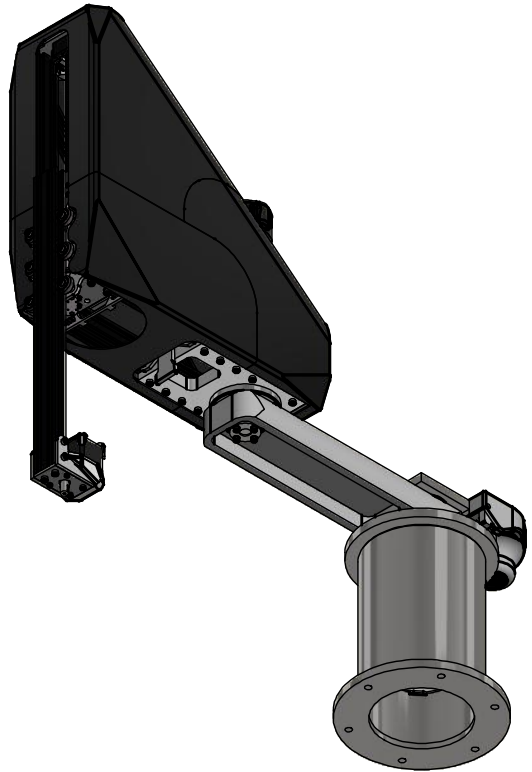
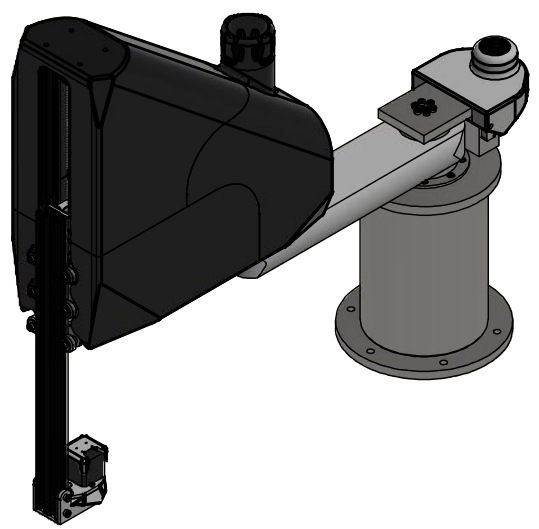
B

B



A

A



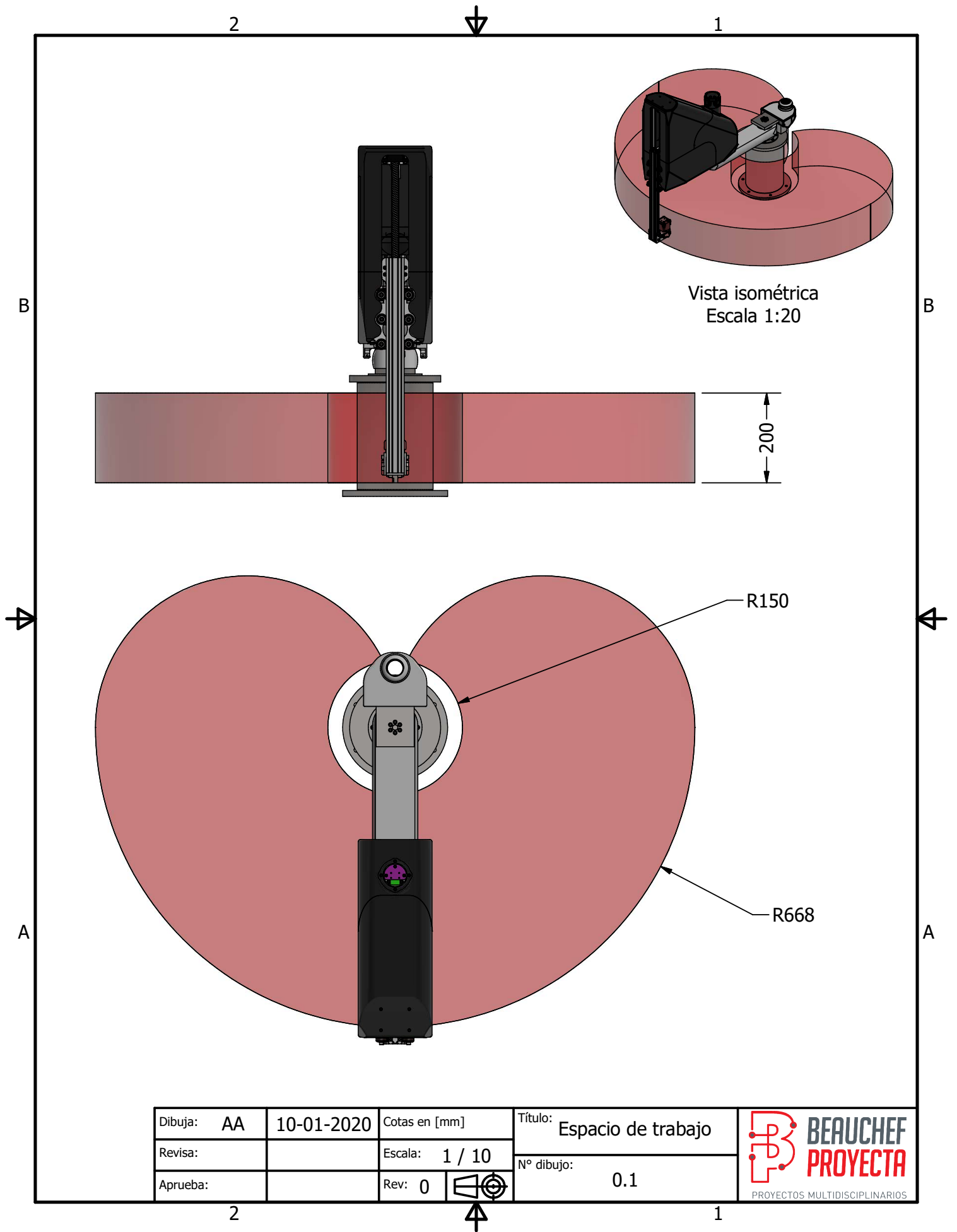
Dibuja: AA	10-01-2020	Cotas en [mm]	Título: Ensamble General
Revisa:		Escala: 1 / 10	Nº dibujo: 0
Aprueba:		Rev: 0	

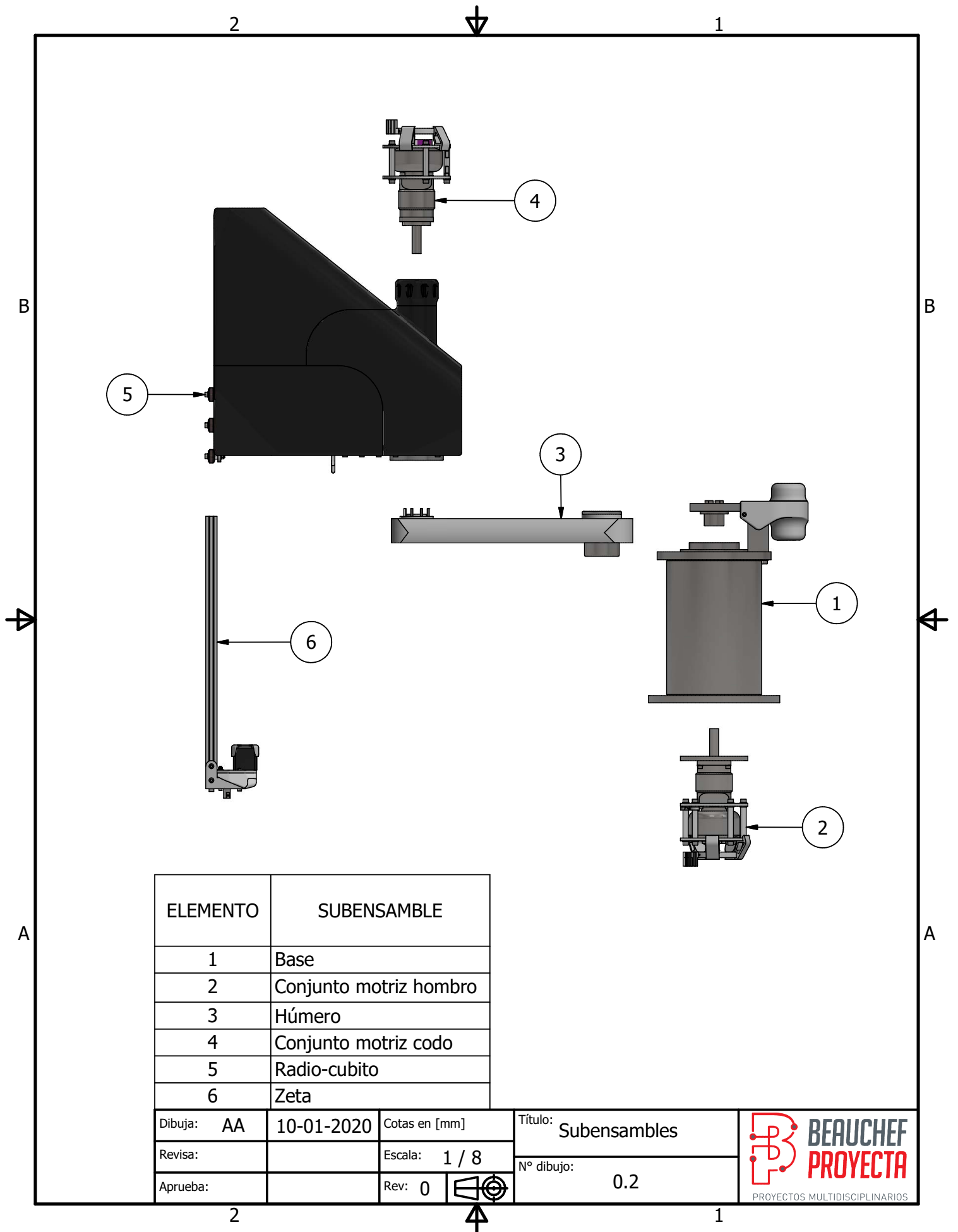


2



1





ELEMENTO	SUBENSAMBLE
1	Base
2	Conjunto motriz hombro
3	Húmero
4	Conjunto motriz codo
5	Radio-cubito
6	Zeta

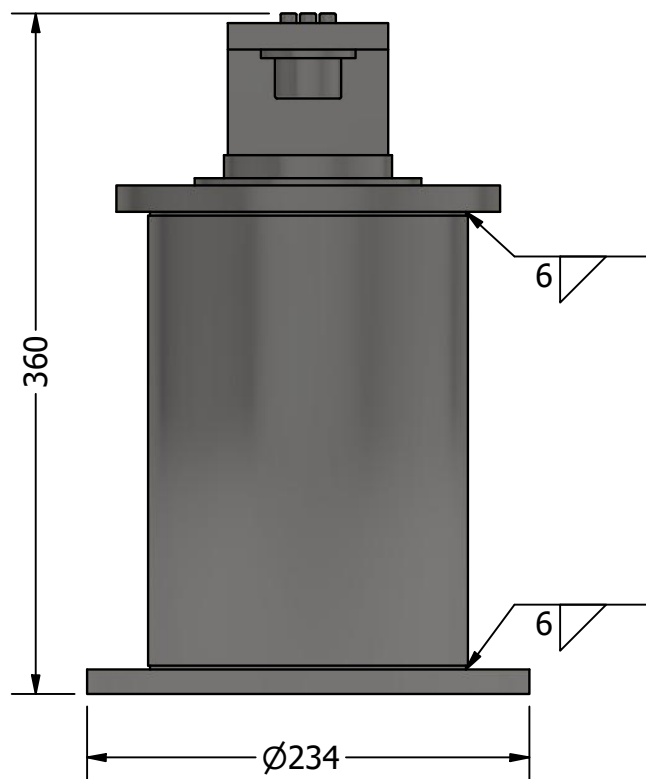
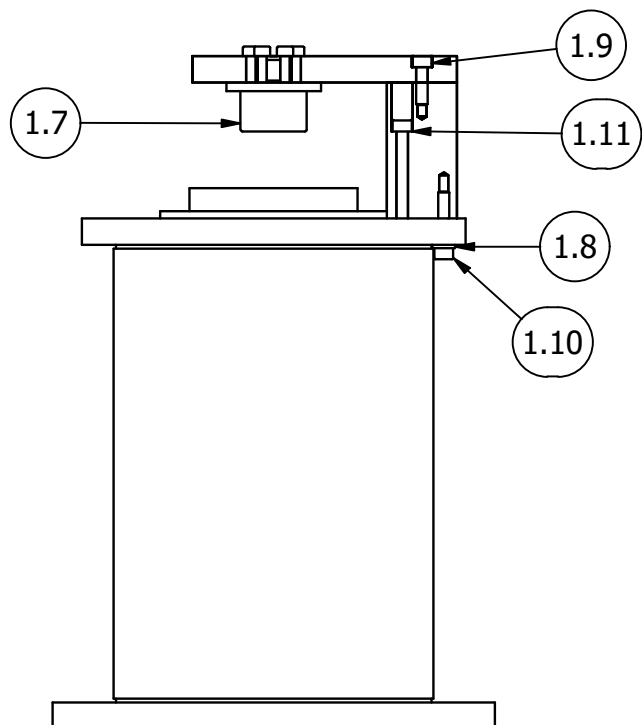
Dibuja: AA	10-01-2020	Cotas en [mm]
Revisa:		Escala: 1 / 8
Aprueba:		Rev: 0

Título: Subensambles
Nº dibujo: 0.2

2

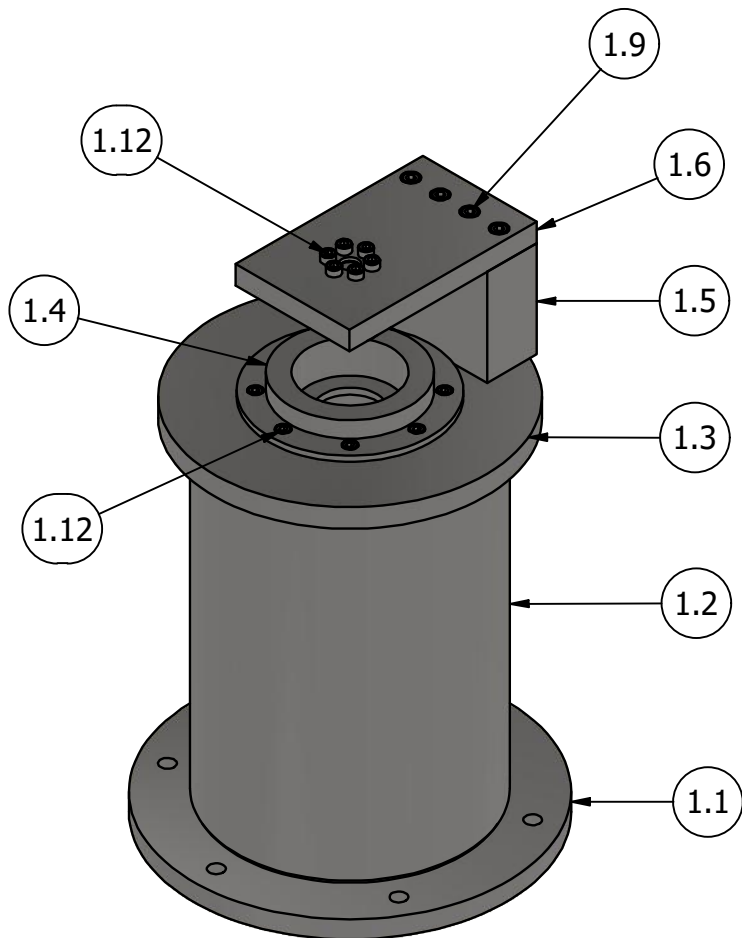


1



Se omiten piezas de PLA para fijar manguera de cables y sensores de fin de carrera.

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	PIEZA
1.1	1	Brida base
1.2	1	Cilindro base
1.3	1	Brida intermedia
1.4	1	Placa porta rodamientos inferior
1.5	1	Bloque espaciador
1.6	1	Placa porta rodamientos superior
1.7	1	Centro rodamiento superior
1.8	2	DIN 125 - A 6,4
1.9	4	DIN 912 - M6 x 20
1.10	2	DIN 912 - M6 x 30
1.11	3	DIN 912 - M6 x 60
1.12	14	DIN 912 - M5 x 25



Dibuja: AA	05-12-2019	Cotas en [mm]
Revisa:		Escala: 1 / 4
Aprueba:		Rev: 0

Título: Base General
Nº dibujo: 1.0



2



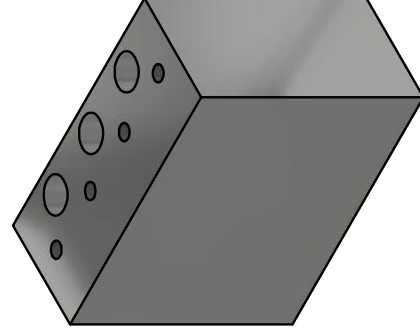
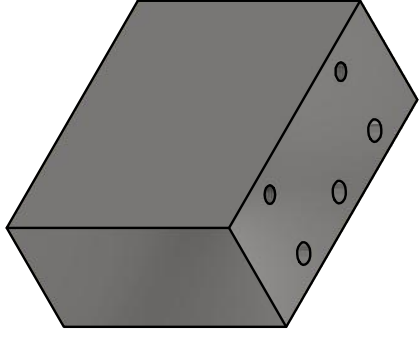
1

1

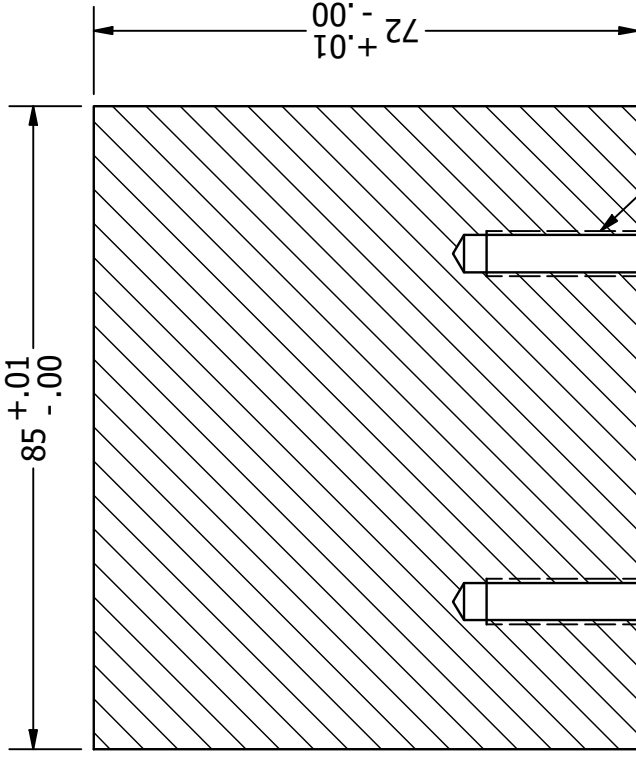
2

B

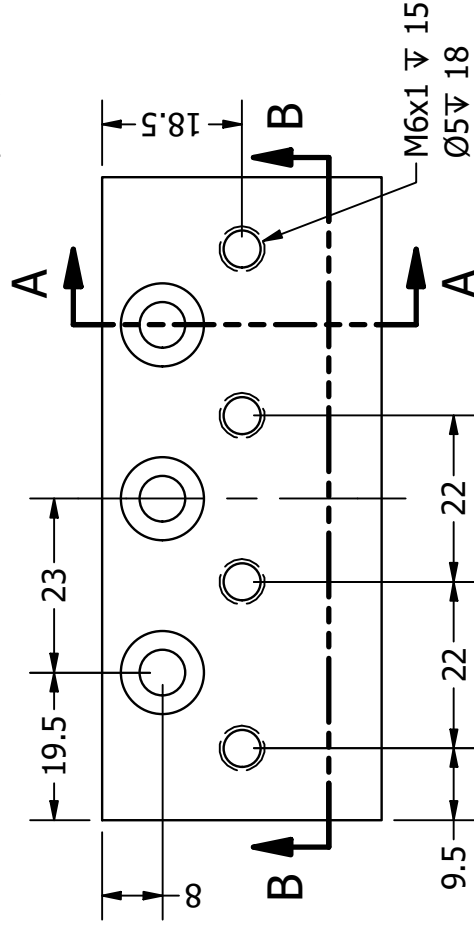
B



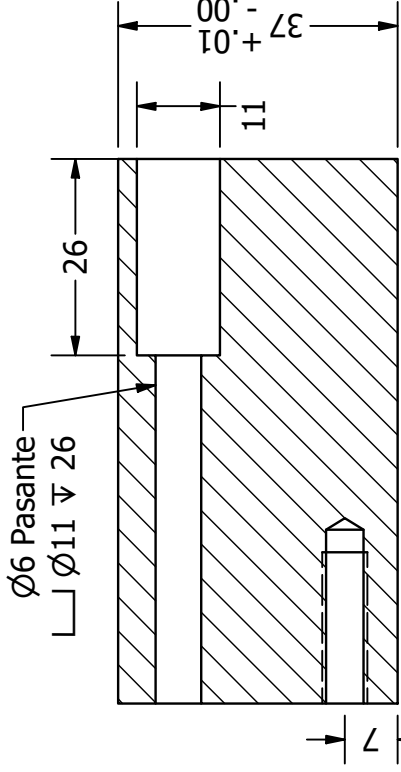
Vista isométrica superior e inferior escala 1:2



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



Ø6 Pasante
└┘ Ø11 ∇ 26

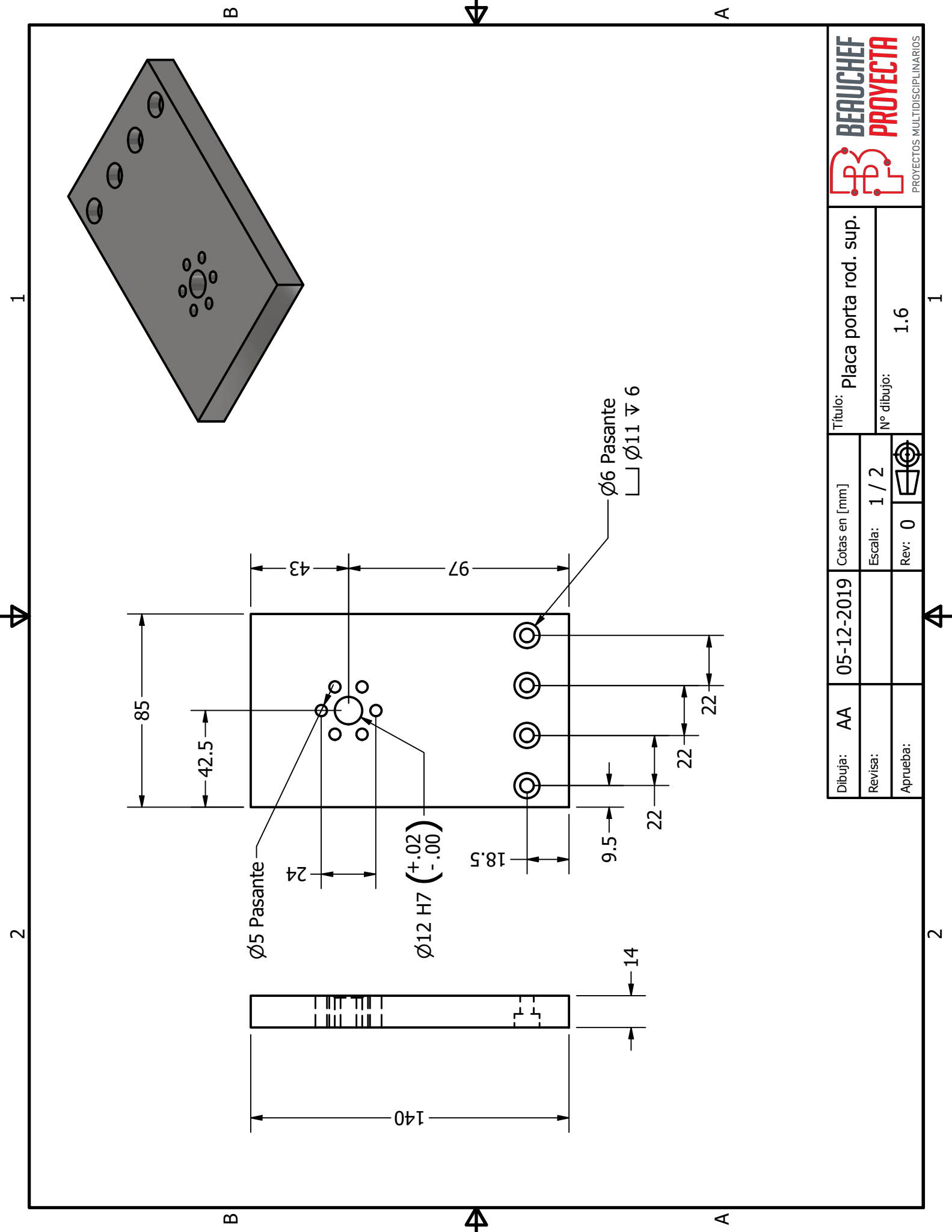
Dibujó:	AA	05-12-2019	Título:	Bloque espaciador
Revisa:			Material:	SAE1.020
Aprueba:			Cotas en [mm]:	1 : 1
			Escala:	1 : 1
			Rev:	0
			Nº dibujo:	1.5



1

2

B



Dibuja:	AA	05-12-2019	Cotas en [mm]	Título: Placa porta rod. sup.	
Revisa:			Escala: 1 / 2	N° dibujo: 1.6	
Aprueba:			Rev: 0	1.6	

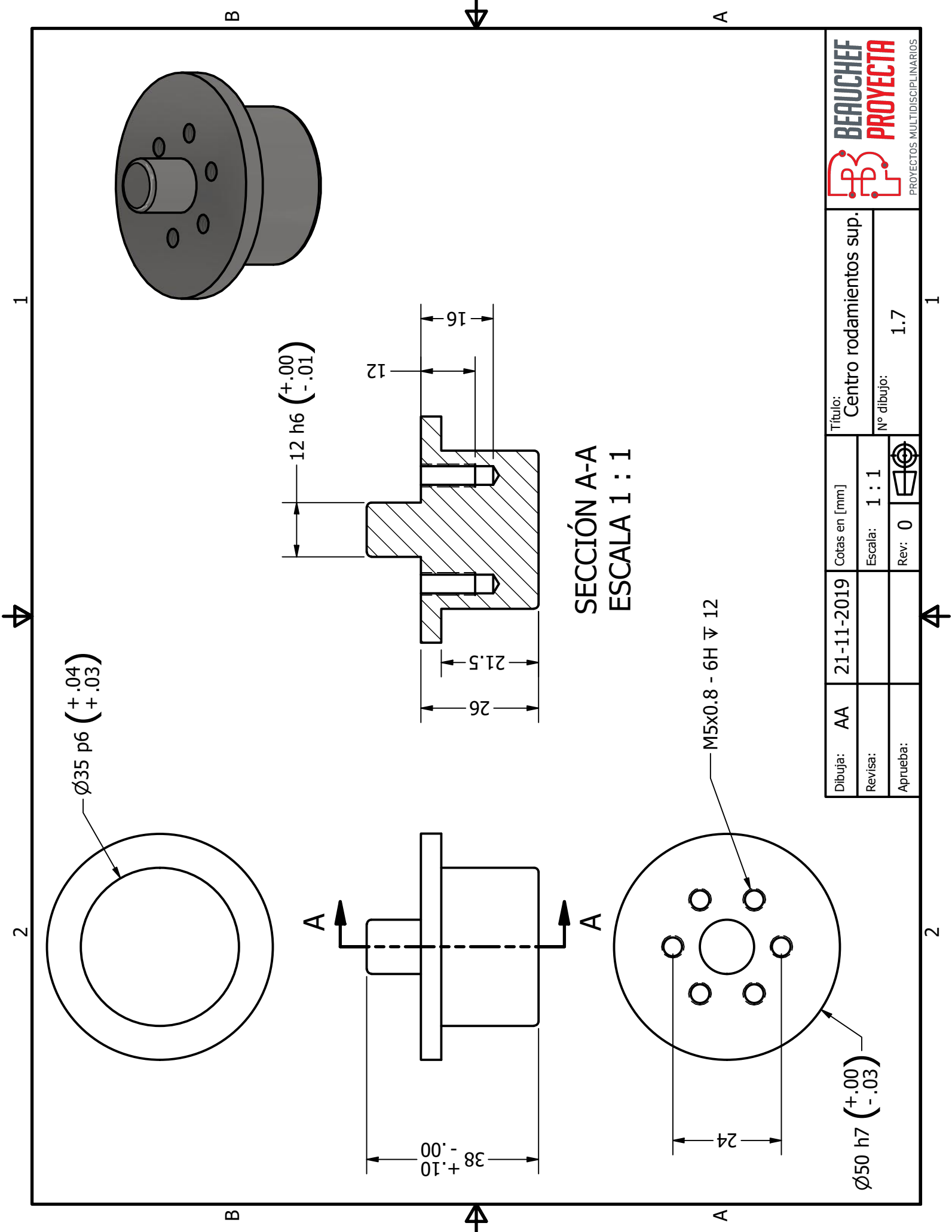


1

2

1

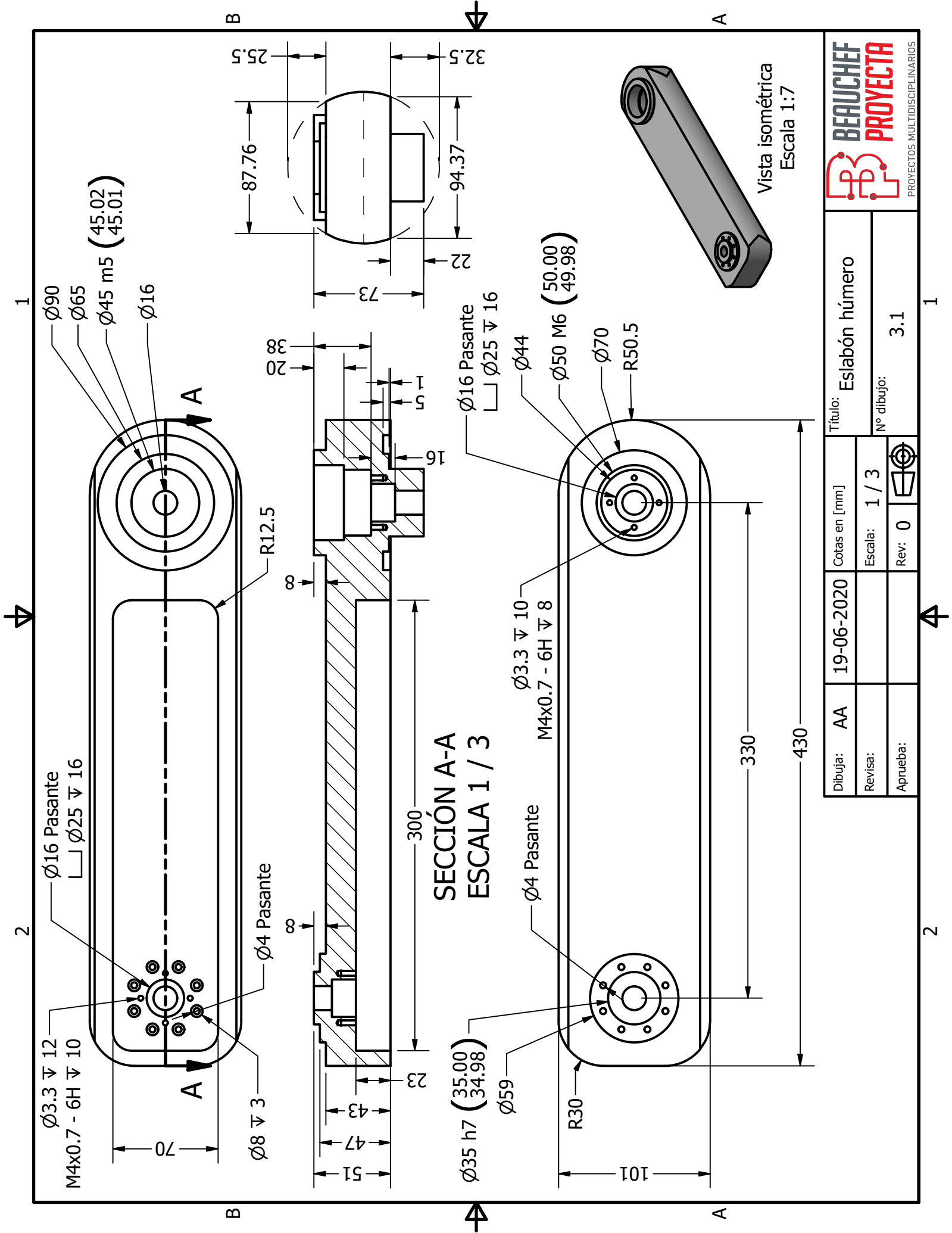
2



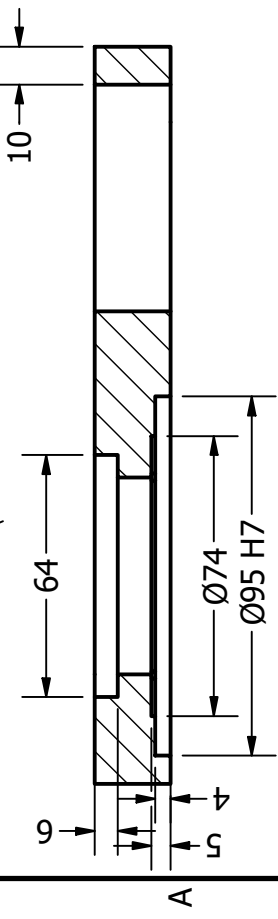
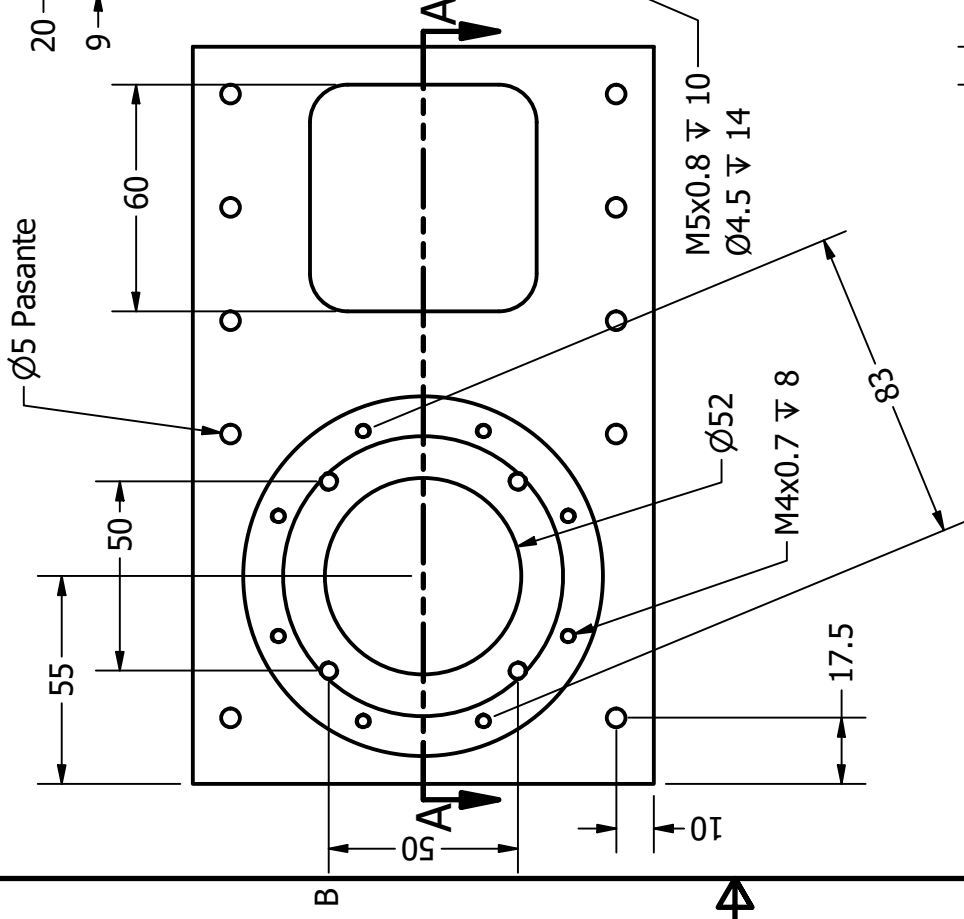
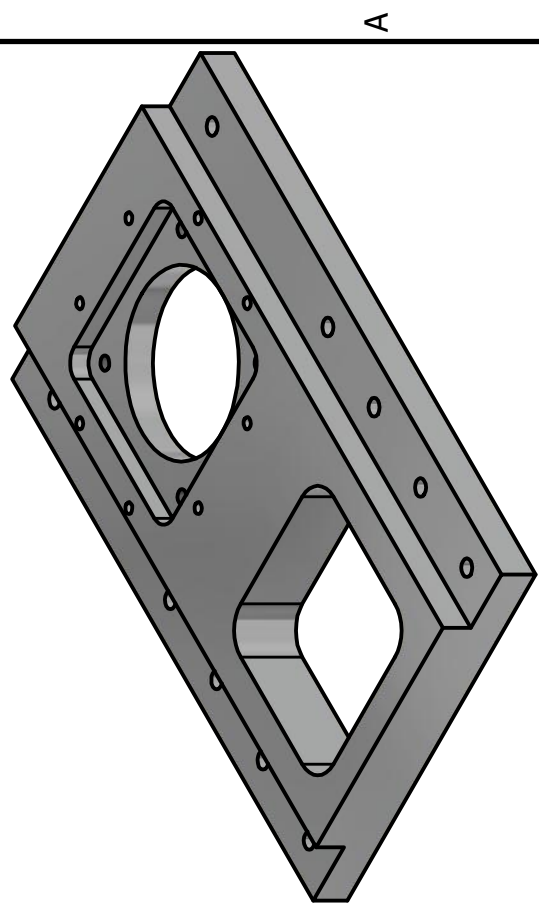
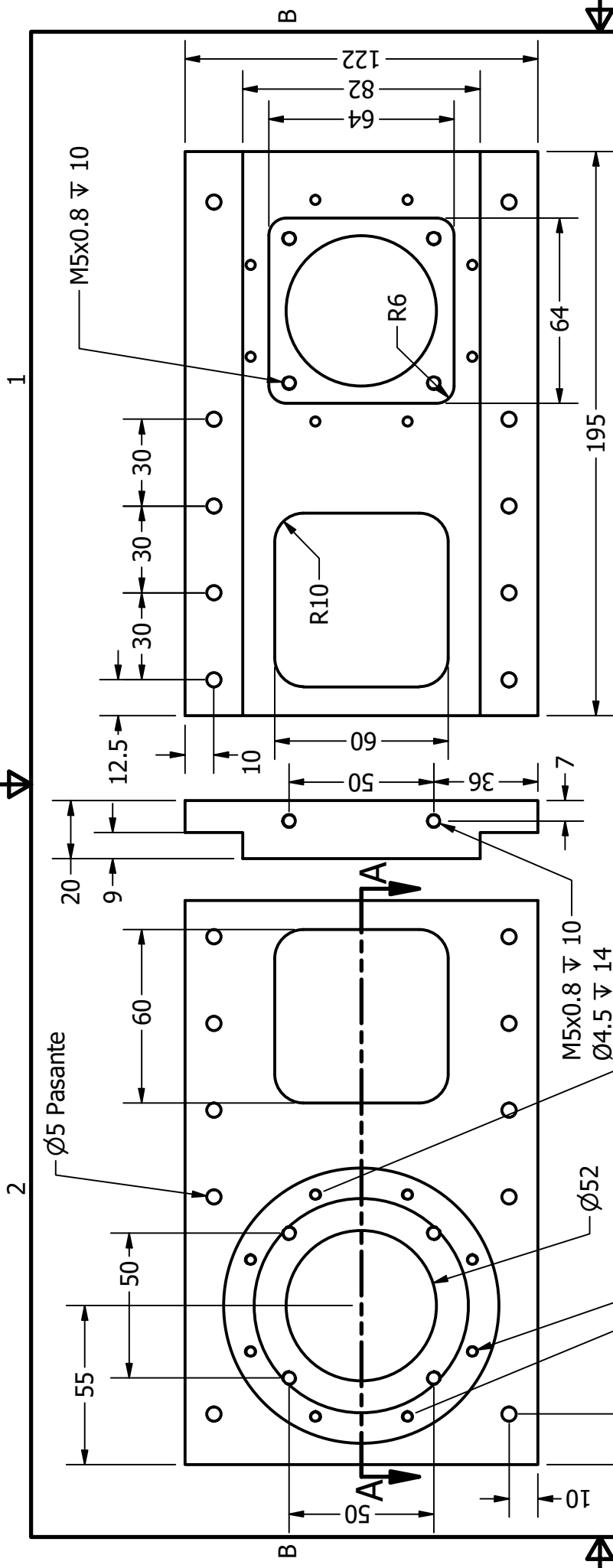
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



Dibuja:	AA	21-11-2019	Cotas en [mm]	Título:	Centro rodamientos sup.
Revisa:			Escala:	1 : 1	Nº dibujo:
Aprueba:			Rev:	0	1.7



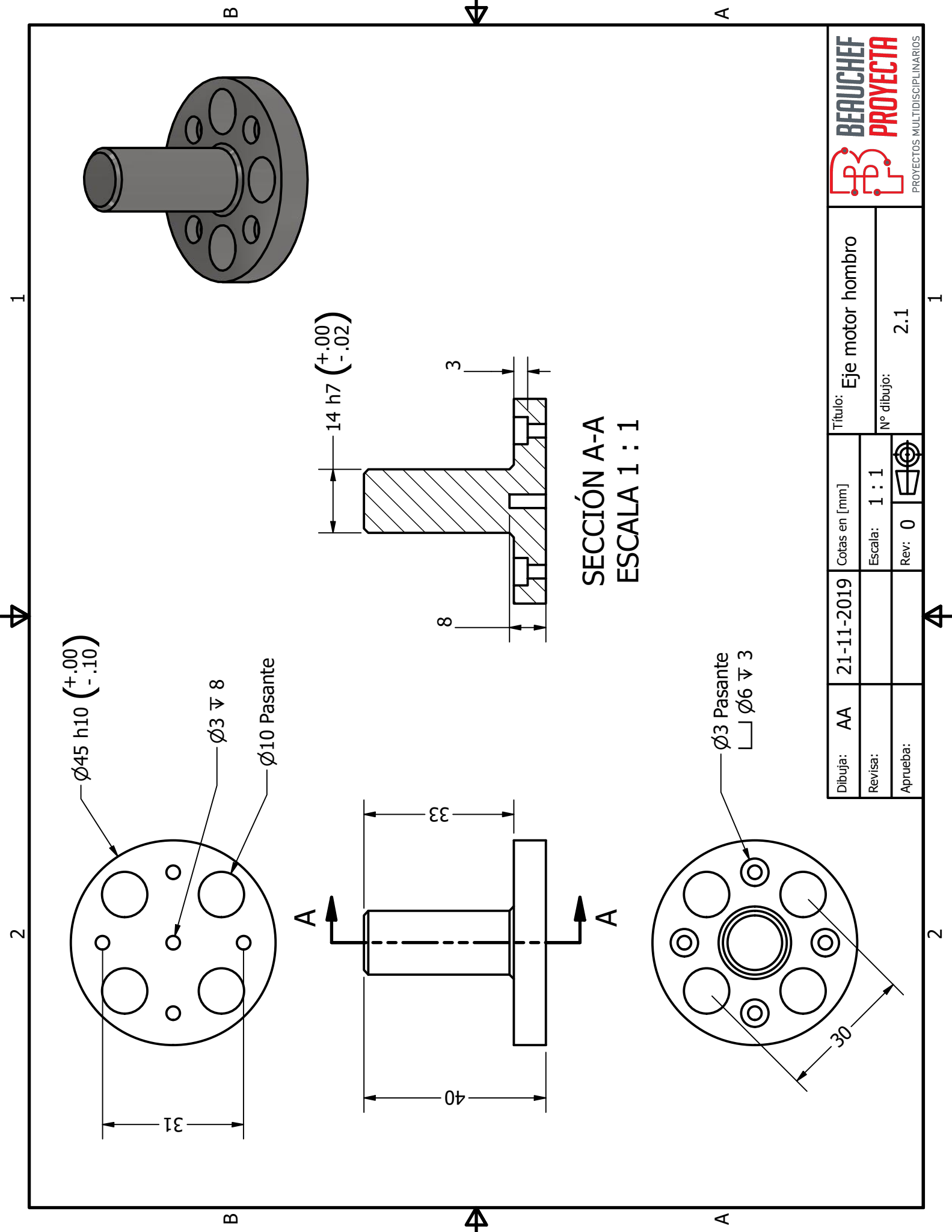
Dibuja: AA	19-06-2020	Cotas en [mm]	Título: Eslabón húmero
Revisa:		Escala: 1 / 3	Nº dibujo: 3.1
Aprueba:		Rev: 0	



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 / 2

Dibuja: AA	05-12-2019	Cotas en [mm]	Título: Base codo
Revisa:		Escala: 1 / 2	Nº dibujo: 5.1
Aprueba:		Rev: 0	





Ø45 h10 (+.00 / -.10)

Ø3 ∇ 8

Ø10 Pasante

31

33

40

14 h7 (+.00 / -.02)

8

3

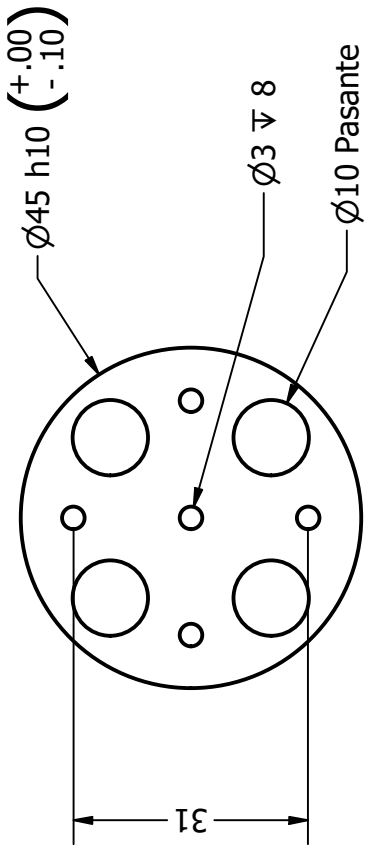
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

Ø3 Pasante
└┘ Ø6 ∇ 3

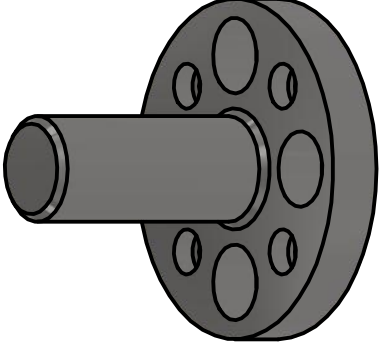
Dibuja:	AA	21-11-2019	Cotas en [mm]	Título:	Eje motor hombro
Revisa:			Escala:	1 : 1	
Aprueba:			Rev:	0	Nº dibujo:
					2.1

1

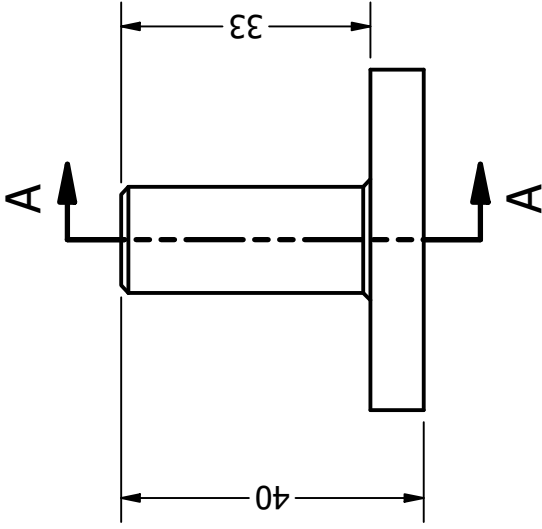
2



B



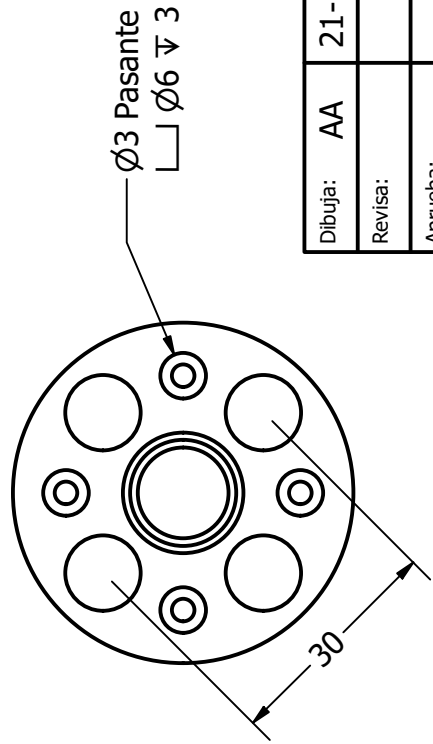
B


 $14\text{ h}7 (+.00 / -.02)$

8

3

SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



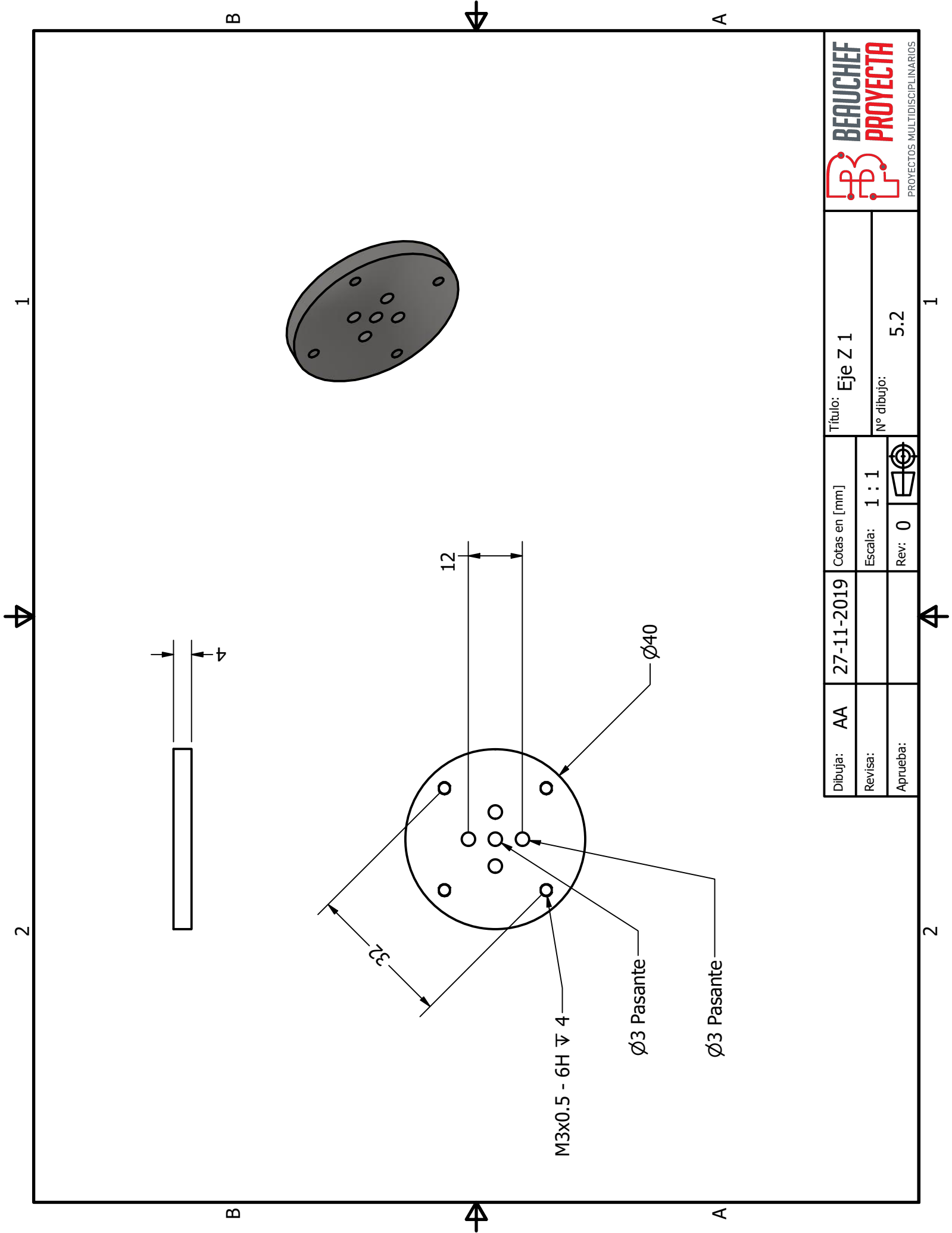
A


*Dimensiones iguales a eje
motor hombro.

Dibuja:	AA	21-11-2019	Cotas en [mm]	Título:	Eje motor codo
Revisa:			Escala:	1 : 1	
Aprueba:			Rev:	0	Nº dibujo:
					4.1

2

1



Dibuja: AA	27-11-2019	Cotas en [mm]	Título: Eje Z 1	
Revisa:		Escala: 1 : 1	N° dibujo: 5.2	
Aprueba:		Rev: 0		

1

2

B

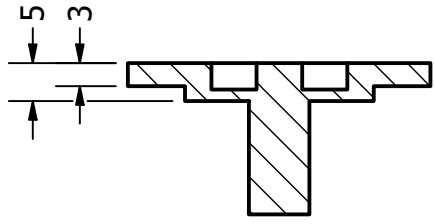
A

B

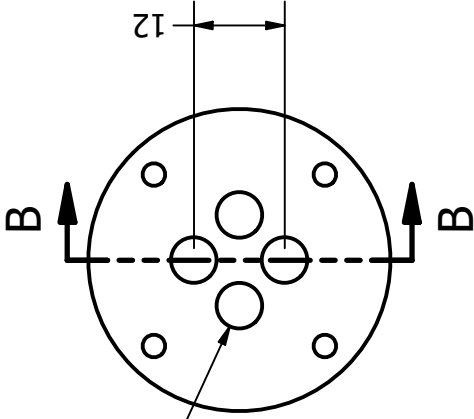
A

1

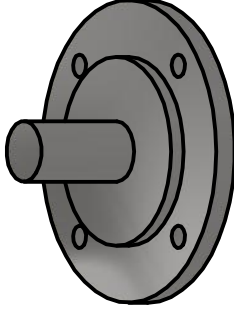
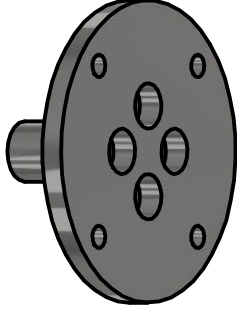
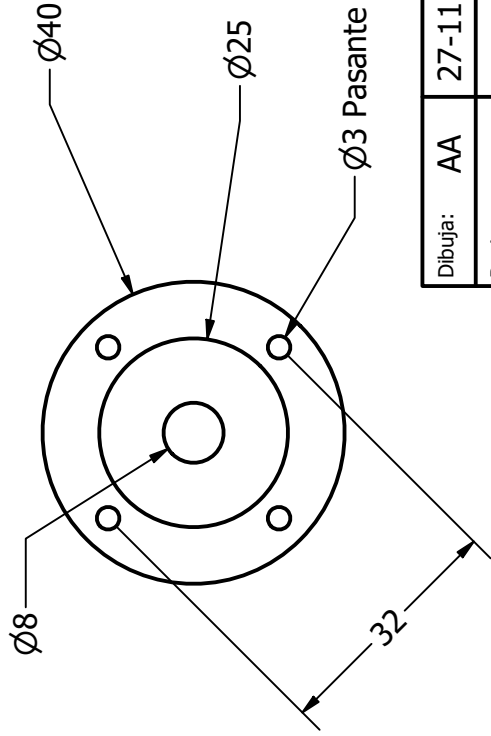
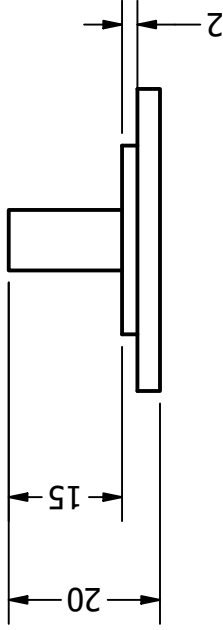
2



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 1



Ø6 ∇ 4



Dibuja: AA	27-11-2019	Cotas en [mm]	Título: Eje Z 2
Revisa:		Escala: 1 : 1	Nº dibujo: 5.3
Aprueba:		Rev: 0	



PROYECTOS MULTIDISCIPLINARIOS

Anexo B

Extractos de catálogos

parameters		规格		PLM060	PLM090	PLM120	PLM140	PLM180
Maximum output torque		Nm	1.5*rated output torque					
Emergency breaking torque		Nm	2.0*rated output torque					
Maximum Radial force		N	1530	3250	6700	9400	14500	
Maximum Axial force		N	630	1300	3000	4700	7250	
Torsion rigidity		Nm/arcmin	7	14	25	50	145	
Maximum input speed		rpm	8000	8000	8000	6000	6000	
Rated input speed		rpm	5000	4000	4000	3000	3000	
Noise		dB	≤58	≤60	≤65	≤68	≤68	
Service life		h	20000					
Full load efficiency		%	L1≥95% L2≥90%					
Backlash	P0	L1	arcmin	≤3	≤3	≤3	≤3	≤3
		L2	arcmin	≤5	≤5	≤5	≤6	≤6
Rotary inertia	L1	3	Kg. cm ²	0.16	0.61	3.25	9.21	28.98
		4	Kg. cm ²	0.14	0.48	2.74	7.54	23.67
		5	Kg. cm ²	0.13	0.47	2.71	7.42	23.29
		6	Kg. cm ²	0.13	0.47	2.71	7.42	22.29
		7	Kg. cm ²	0.13	0.45	2.62	7.14	22.48
		8	Kg. cm ²	0.13	0.45	2.60	7.14	22.48
		9	Kg. cm ²	0.13	0.42	2.59	7.08	22.40
		10	Kg. cm ²	0.13	0.40	2.57	7.03	22.51
	L2	15	Kg. cm ²	0.13	0.45	0.45	2.63	7.30
		20	Kg. cm ²	0.13	0.45	0.45	2.63	7.30
		25	Kg. cm ²	0.13	0.45	0.45	2.63	7.30
		30	Kg. cm ²	0.13	0.45	0.45	2.63	7.30
		35	Kg. cm ²	0.13	0.45	0.45	2.43	7.10
		40	Kg. cm ²	0.13	0.45	0.45	2.43	6.92
		50	Kg. cm ²	0.13	0.40	0.40	2.39	6.92
70	Kg. cm ²	0.13	0.40	0.40	2.39	6.72		
100	Kg. cm ²	0.13	0.40	0.40	2.39	6.72		

Figura B.1: Especificaciones reductoras planetarias PLM (China).

Parameters		规格		PLM060	PLM090	PLM120	PLM140	PLM180
		Stage	Ratio					
Rated output torque (N·m)	L1	3		30	50	120	280	800
		4		45	85	210	440	800
		5		45	85	210	440	1000
		6		45	85	210	440	1000
		7		45	85	210	440	1000
		8		40	80	200	400	800
		9		30	60	140	300	700
		10		30	60	140	300	700
	L2	15		30	50	120	280	800
		20		45	85	210	440	800
		25		45	85	210	440	1000
		30		30	60	140	300	700
		35		45	85	210	440	1000
		40		45	85	210	440	1000
		50		45	85	210	440	1000
		70		45	85	210	440	1000
		100		30	60	140	300	700

Figura B.2: Especificaciones reductoras planetarias PLM (China) (continuación).

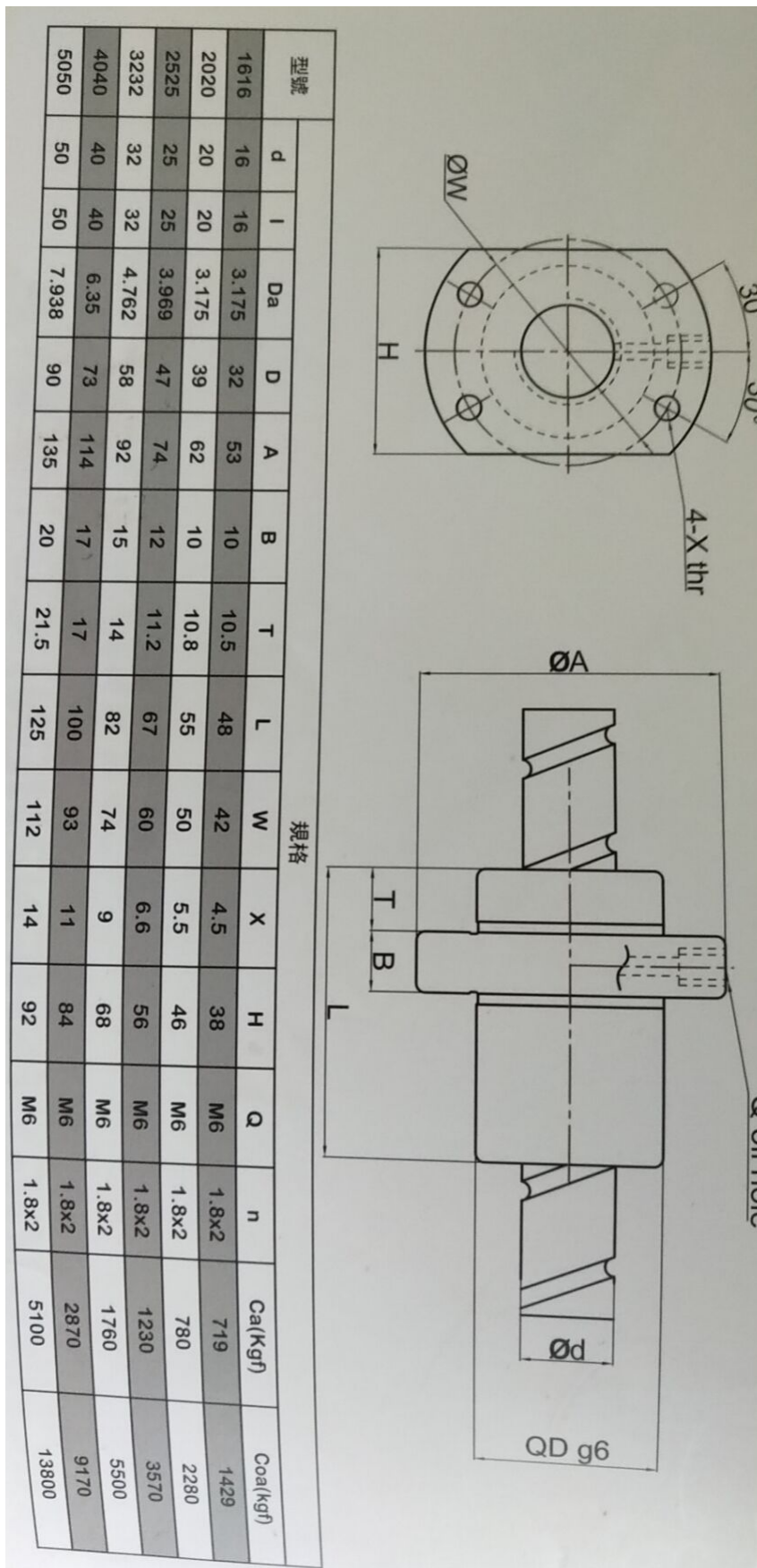


Figura B.3: Especificaciones tornillo de bolas SFE (China).

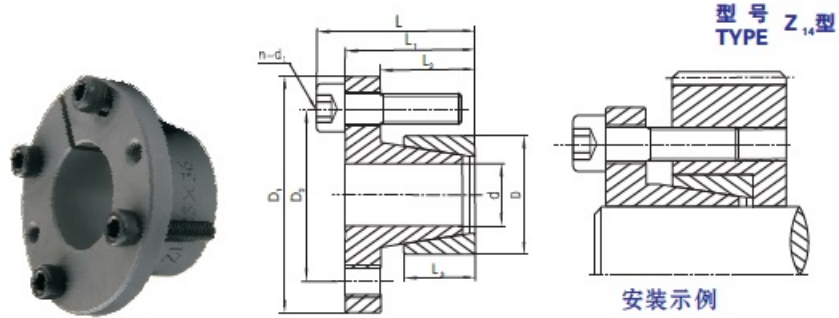
Gearbox Performance

Model No.	Stage	Ratio	AE050	AE070	AE090	AE120	AE155	AE205	AE235	
Nominal output torque T_{2N}	1	3	20	55	130	208	342	588	1,140	
		4	19	50	140	290	542	1,050	1,700	
		5	22	60	160	330	650	1,200	2,000	
		6	20	55	150	310	600	1,100	1,900	
		7	19	50	140	300	550	1,100	1,800	
		8	17	45	120	260	500	1,000	1,600	
		9	14	40	100	230	450	900	1,500	
		10	14	40	100	230	450	900	1,500	
		2	15	20	55	130	208	342	588	1,140
			20	19	50	140	290	542	1,050	1,700
	25		22	60	160	330	650	1,200	2,000	
	30		20	55	150	310	600	1,100	1,900	
	35		19	50	140	300	550	1,100	1,800	
	40		17	45	120	260	500	1,000	1,600	
	45		14	40	100	230	450	900	1,500	
	50		22	60	160	330	650	1,200	2,000	
	60		20	55	150	310	600	1,100	1,900	
	70		19	50	140	300	550	1,100	1,800	
	80	17	45	120	260	500	1,000	1,600		
	90	14	40	100	230	450	900	1,500		
100	14	40	100	230	450	900	1,500			
Emergency Stop Torque T_{2NCT}^2	Nm	1,2	3 times of nominal output torque							
Nominal input speed n_{1N}	rpm	1,2	3~100	5,000	5,000	4,000	4,000	3,000	3,000	2,000
Max. input speed n_{1B}	rpm	1,2	3~100	10,000	10,000	8,000	8,000	6,000	6,000	4,000
Backlash	arcmin	1	3~10	≤8	≤8	≤8	≤8	≤8	≤8	≤8
		2	15~100	≤12	≤12	≤12	≤12	≤12	≤12	≤12
Torsional rigidity	Nm/arcmin	1,2	3~100	3	7	14	25	50	145	225
Max. Radial Load F_{2a}^3	N	1,2	3~100	702	1,377	2,985	6,100	8,460	13,050	8,700
Max. Axial Load F_{2ab}^3	N	1,2	3~100	390	765	1,625	3,350	4,700	7,250	18,000
Service life	hr	1,2	3~100	20,000*						
Efficiency η	%	1	3~10	≥97%						
		2	15~100	≥94%						
Weight	kg	1	3~10	0.6	1.4	3.3	6.9	13	31	53
		2	15~100	0.9	1.6	4.7	8.7	17	35	66
Operating temp	°C	1,2	3~100	-10°C~90°C						
Lubrication				Synthetic lubrication oils						
Degree of gearbox protection		1,2	3~100	IP65						
Mounting position		1,2	3~100	all directions						
Noise Level ($n_1=3000\text{rpm}$, NoLoad)	dB(A)	1,2	3~100	≤56	≤58	≤60	≤63	≤65	≤67	≤70

Figura B.4: Especificaciones reductoras planetarias serie AE de APEX Dynamics [15].

Max. backlash quantity		See engineering datafor a description of terms.									
		Table 150-3									
Ratio	Size	14	17	20	25	32	40	45	50	58	65
30	×10 ⁻³ rad	29.1	16.0	13.6	13.6	11.2	—	—	—	—	—
	arc sec	60	33	28	28	23	—	—	—	—	—
50	×10 ⁻³ rad	17.5	9.7	8.2	8.2	6.8	6.8	5.8	5.8	4.8	4.8
	arc sec	36	20	17	17	14	14	12	12	10	10
80	×10 ⁻³ rad	11.2	6.3	5.3	5.3	4.4	4.4	3.9	3.9	2.9	2.9
	arc sec	23	13	11	11	9	9	8	8	6	6
100	×10 ⁻³ rad	8.7	4.8	4.4	4.4	3.4	3.4	2.9	2.9	2.4	2.4
	arc sec	18	10	9	9	7	7	6	6	5	5
120	×10 ⁻³ rad	—	3.9	3.9	3.9	2.9	2.9	2.4	2.4	1.9	1.9
	arc sec	—	8	8	8	6	6	5	5	4	4
160	×10 ⁻³ rad	—	—	2.9	2.9	2.4	2.4	1.9	1.9	1.5	1.5
	arc sec	—	—	6	6	5	5	4	4	3	3

Figura B.5: Backlash en Harmonic Drive serie CSF - CSG.



基本尺寸 Fundamental dimension								螺钉 bolt		额定负荷 Rated load		轴结合面 上的压力 pressure on shaft P_r N/mm ²	毂结合面 上的压力 pressure on hub P_r' N/mm ²	螺钉的 拧紧力矩 torque of tighten- ing bolt M_t N·m	重量 Weight Kg
d	D	D ₁	D ₂	L	L ₁	L ₂	L ₃	d ₁	n	扭矩 Torque M _t N·m	轴向力 force F _t kN				
mm															
14	25	42	33	30	26	20	16	M4	4	64	9.2	109	61	2.9	0.091
16	25	42	33	30	26	20	16	M4	4	74	9.2	95	61	2.9	0.082
18	25	42	33	30	26	20	16	M4	4	82	9.2	85	61	2.9	0.072
19	25	42	33	30	26	20	16	M4	4	87	9.2	80	61	2.9	0.068
20	30	50	39	31	26	20	16	M5	4	150	15	124	82	6	0.113
22	30	50	39	31	26	20	16	M5	4	165	15	113	82	6	0.11
24	30	50	39	31	26	20	16	M5	4	180	15	104	82	6	0.088
25	36	55	45	31	26	20	16	M5	4	187	15	100	69	6	0.144
28	36	55	45	31	26	20	16	M5	4	210	15	89	69	6	0.121
30	36	55	45	31	26	20	16	M5	4	225	15	83	69	6	0.105
32	42	62	51	33	28	20	16	M5	4	240	15	77	59	6	0.2
35	42	62	51	33	28	20	16	M5	4	260	15	71	59	6	0.173
36	42	62	51	33	28	20	16	M5	4	270	15	69	59	6	0.162
38	44	66	54	34	28	20	16	M6	4	400	21.2	93	80	10	0.182
40	48	70	58	34	28	20	16	M6	4	425	21.2	88	73	10	0.223
42	48	70	58	34	28	20	16	M6	4	446	21.2	83	73	10	0.191
45	55	82	67	43	35	25	20	M8	4	875	38.9	115	94	25	0.4
48	55	82	67	43	35	25	20	M8	4	935	38.9	107	94	25	0.35
50	62	89	74	43	35	25	20	M8	4	974	38.9	103	83	25	0.5
55	62	89	74	43	35	25	20	M8	4	1070	38.9	94	83	25	0.41
60	72	99	84	43	35	25	20	M8	4	1165	38.9	86	71	25	0.58
65	72	99	84	43	35	25	20	M8	4	1265	38.9	79	71	25	0.46

Figura B.6: Especificaciones catálogo acoples sin chaveta marca Chaoyue modelo Z14.