



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO MECÁNICO DE UN ROBOT
ANTROPOMÓRFICO DE 5 GRADOS DE LIBERTAD
ANTHROPOMORPHIC 5 DOF ROBOT
MECHANICAL DESIGN

Autor

Juan Adán Laguna

Director

Daniel Mercado Barraqueta

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. JUAN ADÁN LAGUNA,

con nº de DNI 73029680b en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
GRADO EN ING. DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES, (Título del Trabajo)
DISEÑO MECÁNICO DE UN ROBOT ANTROPOMÓRFICO DE 5 GRADOS DE
LIBERTAD

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 3 DE AGOSTO DE 2016

Fdo: JUAN ADÁN LAGUNA

DISEÑO MECÁNICO DE UN ROBOT ANTROPOMÓRFICO DE 5 GRADOS DE LIBERTAD. RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado aborda el diseño mecánico y electrónico de un Brazo Robótico de 5 ejes, capaz de realizar los movimientos necesarios para jugar con precisión al ping-pong.

Tras un análisis de diferentes configuraciones de Robot actuales, se ha escogido la de Robot Angular. Dicha configuración se compone de 5 ejes de rotación, tres para posicionar el elemento terminal y dos para su orientación. Posteriormente, con ayuda de diversas simulaciones en *Pro-Engineer*, se han estudiado las variantes constructivas de esta configuración, para alcanzar un diseño definitivo a partir de las especificaciones dadas.

En primer lugar, se ha realizado un cálculo aproximado del espacio de trabajo, en base a las trayectorias seguidas por la pelota de ping-pong, para determinar las dimensiones globales del Brazo Robótico. Una vez conocidas, se han realizado numerosas simulaciones creando modelos 3D y aplicando Análisis Dinámicos a los mismos. En todos ellos, los datos de entrada han sido las velocidades articulares, introducidos como una curva con dos tramos de aceleración y deceleración constante, y un tramo de velocidad constante. De estas simulaciones se han obtenido los pares motores necesarios para producir dicha velocidad, permitiendo así seleccionar los motores para cada eje, y adecuar el Brazo Robótico cuando no se cumplieran las especificaciones de velocidad.

Tras sucesivas simulaciones, se ha llegado a un diseño final, consistente en un Brazo Robótico con 5 ejes, siendo el primero de ellos vertical, compuesto por 5 elementos principales (Bancada, Base, Brazo 1, Brazo 2 y Elemento Terminal). Se ha optado por incorporar un tirante que transmite el giro al tercer eje, manteniendo el segundo y tercer motor solidarios a primer brazo (Base). El elemento terminal se compone de dos sólidos, muñeca y pala, y permite dos giros (suficientes para la orientación de un plano). Se utilizan tres motores paso a paso para los tres primeros ejes, y dos Servomotores para los giros del Elemento Terminal.

Una vez concretado el diseño final, se ha realizado un Análisis Cinemático y Dinámico de la estructura, de manera analítica, para comprobar los resultados obtenidos mediante las simulaciones con *Pro-Engineer*. Se ha utilizado la herramienta de cálculo *Matlab* para obtener los resultados numéricos. También se ha realizado un Estudio Resistente de los componentes más solicitados, mediante el programa *SolidWorks*. Además, se han realizado los planos de todos los componentes del Brazo, para una futura construcción.

Paralelamente, se ha diseñado el Software y Hardware necesarios para el movimiento simultáneo de los cinco motores del Robot. Para ello, se ha empleado una placa de desarrollo *Arduino*, además de otros Drivers de control electrónicos para los motores. El código realizado se ha programado en lenguaje *Arduino*, para una posterior implementación en la placa. Con ayuda del programa *Fritzing*, se ha realizado una simulación del montaje electrónico, así como un esquemático del mismo.

La clara continuación del presente trabajo es la construcción y puesta en marcha del Brazo Robótico aquí descrito. Aunque queda fuera del alcance de este Trabajo Fin de Grado, sería el siguiente paso para comprobar todas las simulaciones e introducir mejoras, tanto en el diseño como en el control de los motores.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	6
OBJETO.....	6
ALCANCE.....	7
SECCIÓN 1. ESTUDIO DE LA TÉCNICA.....	8
1.1 Cadena Cinemática Abierta.....	8
1. Robot Cartesiano (PPP).....	8
2. Robot Cilíndrico (RPP).....	8
3. Robot Polar (RRP).....	8
4. Robot Angular (RRR).....	9
5. Robot SCARA (RRP).....	9
1.2 Cadena Cinemática Cerrada.....	10
1. Robot Paralelo.....	10
1.3 Variantes constructivas de un Brazo Robótico Angular con 5 Grados de Libertad.....	11
1. Robot angular de planos coincidentes o paralelos.....	11
2. Compensación en gravedad o robot descompensado.....	11
3. Motores en las articulaciones o transmisión.....	11
4. Robot angular con base fija o móvil.....	12
SECCIÓN 2. APROXIMACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO.....	13
2.1 Determinación del parámetro L.....	14
2.2 Determinación del parámetro W.....	14
2.3 Determinación del parámetro H.....	14
SECCIÓN 3. DISEÑO INICIAL.....	15
3.1 Especificaciones de Partida.....	15
3.2 Diseños mediante Pro-Engineer. Elementos comunes a todos los diseños.....	16
3.3 Brazo Robótico RRR No Equilibrado.....	18
3.4 Brazo Robótico RRR Equilibrado.....	20
SECCIÓN 4. MODIFICACIONES AL DISEÑO INICIAL.....	23
4.1 Disminución del tamaño.....	23
4.2 Brazo Robótico con Tirante.....	25
SECCIÓN 5. REDISEÑO CONSTRUCTIVO.....	28
5.1 Alojamiento de los motores.....	28
5.2 Alojamiento de los rodamientos.....	32

SECCIÓN 6. TRANSMISIONES Y SENSORES. DISEÑO FINAL.....	34
6.1 Reductoras.....	34
Transmisión por correa dentada en Eje 1	34
Transmisión por engranaje en Eje 2.....	35
6.2 Sensores final de carrera	35
Colocación en Eje 1.....	36
Colocación en Eje 2 y Eje 3	36
6.3 Diseño Final	38
SECCIÓN 7. DETERMINACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO FINAL	41
7.1 Volumen total alcanzable	41
7.2 Espacio de trabajo	42
SECCIÓN 8. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DEL MECANISMO	43
8.1 Análisis Cinemático	43
8.2 Análisis Dinámico.....	44
8.3 Resolución y obtención de Pares Motores	44
SECCIÓN 9. ESTUDIO DE RESISTENCIA.....	46
9.1 Brazo 3	46
9.2 Brazo 2.....	47
9.3 Tirante 3	47
9.4 Tirante 1	48
9.5 Asiento Motores 2 y 3	49
9.6 Base.....	50
9.7 Bancada.....	51
SECCIÓN 10. ALGORITMO DE CONTROL.....	52
10.1 Componentes electrónicos.....	52
10.2 Implementación del Software.....	53
10.3 Hardware de control.....	54
CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ÍNDICE DE FIGURAS	57
INDICE DE TABLAS	58
ÍNDICE DE GRÁFICAS	59

ANEXOS

ANEXO 1. ESPACIO DE TRABAJO	60
1.1 Cálculo del parámetro L.....	60
1.2 Cálculo del parámetro W.....	63
1.3 Cálculo del espacio de trabajo final	63
ANEXO 2. CÁLCULO DE CONTRAPESOS	65
2.1 Equilibrado del Brazo 3.....	66
2.2 Equilibrado del Brazo 2.....	67
ANEXO 3. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	70
ANEXO 4. ANÁLISIS POR NEWTON.....	74
4.1 Análisis Cinemático	74
4.2 Análisis Dinámico	76
4.3 MATLAB	79
ANEXO 5. CONTROL DE LOS MOTORES	91
5.1 Algoritmo de control	91
1. Declaración de variables y objetos	92
2. Setup.....	92
3. Subrutina final de carrera	93
4. Subrutina mcm	93
5. Subrutina de comunicación	93
6. Bucle principal	94
7. Interrupción pin 2	94
8. Interrupción timer.....	94
5.2 Código en Arduino	96
5.3 Implementación Hardware	103
ANEXO 6. PLANOS	104
ANEXO 7. MOTORES. HOJA DE CARACTERÍSTICAS	105

INTRODUCCIÓN

El rápido avance de la electrónica en los últimos años, unido al desarrollo de nuevos métodos de fabricación como la Impresión 3D o el corte por láser, han permitido al usuario disponer de tecnologías anteriormente sólo accesibles para la industria o la investigación. Esto ha propiciado la proliferación de robots “caseros”, de muy diversos usos.

A raíz de este hecho, surge la idea realizada en el presente trabajo, como iniciativa para desarrollar un prototipo viable que aúne algunas de estas nuevas tecnologías. Para ello, es necesario definir el objetivo claro del prototipo, pues de él dependerán todos los diseños y especificaciones posteriores. Si bien es cierto que existen multitud de prototipos con usos diversos, pocos de estos responden a la necesidad de realizar tareas complejas, simulando la cinemática humana.

Uno de estos campos poco explorados es la implementación de un sistema mecánico que sea capaz de practicar deportes de raqueta, y en concreto Ping-Pong. La necesidad de rápidos movimientos en el juego, combinado con un espacio de trabajo relativamente pequeño y unas sollicitaciones de fuerza no elevadas, hacen de este deporte la opción idónea para la implementación de un prototipo de bajo coste.

Por tanto, se ha escogido como meta el diseño de un Brazo Robótico Antropomórfico, que pueda cumplir dicho objetivo.

OBJETO

El trabajo expuesto a continuación se enmarca dentro de un conjunto, formado por cuatro TFG, para el *Diseño, Implementación y Control de un Robot Antropomórfico de 5 Grados de Libertad*. La filosofía de todos ellos ha sido alcanzar un compromiso entre el bajo coste de su construcción y la obtención de las prestaciones de velocidad y precisión necesarias para el correcto desarrollo de su objetivo final.

El objeto del presente trabajo es, por tanto, el Diseño de un Robot Antropomórfico de 5 Grados de Libertad, capaz de mantener una partida de Ping-Pong contra un adversario humano. Para ello, deberá ser capaz de anticiparse a la trayectoria de la pelota, posicionarse en el punto de golpeo con la suficiente antelación, y realizar un movimiento de golpeo con la precisión necesaria para devolver la pelota a un punto previamente calculado.

Dicho brazo robótico debe incluir los actuadores necesarios para el posicionamiento del elemento terminal, una pala de ping-pong, en el tiempo indicado. Además, los elementos estructurales del Brazo deberán ser de bajo coste y sencilla construcción, en vistas a un posible desarrollo futuro.

Por último, se deberá disponer de los sensores necesarios para el control del Brazo Robótico. Dicho control se realizará en Bucle Abierto, debido al aumento del coste económico y computacional derivado de los sensores de posición para el control en Bucle Cerrado.

ALCANCE

A continuación, se indican los principales puntos definidos en el alcance de este Proyecto:

- ❖ Elección, diseño y comprobación de la estructura robótica óptima para el objetivo del proyecto, teniendo en cuenta aspectos esenciales como el coste económico, el peso, las prestaciones de velocidad y par, la dificultad en el control y la precisión de la estructura.
- ❖ Selección de los actuadores necesarios para alcanzar las especificaciones de par y velocidad requeridas, limitados por el peso y el coste económico de los mismos. Selección de los sensores necesarios para el control de dichos actuadores.
- ❖ Implementación del sistema de control de los actuadores y sensores mediante un controlador de la familia Arduino, basándose en el lenguaje propio del controlador y valiéndose de las librerías ya implementadas para el mismo. Además, se implementará el sistema de comunicación entre éste y los demás microcontroladores presentes en el Brazo Robótico.
- ❖ Elección y desarrollo del sistema de Electrónica Hardware necesario para el correcto posicionamiento y control del Brazo Robótico.

SECCIÓN 1. ESTUDIO DE LA TÉCNICA

En esta sección se presentarán las diferentes estructuras de Brazo Robótico de 5 ejes, poniendo de manifiesto sus ventajas e inconvenientes con respecto al objetivo del mismo. Se hará una primera selección en base a estos criterios.

De acuerdo a la estructura constructiva del Robot, estos se pueden dividir en *Estructuras de Cadena Cinemática Abierta* y *Estructuras de Cadena Cinemática Cerrada* (Ollero Baturone, 2001). Dentro de estos dos grupos, los Robots se clasifican atendiendo al tipo de articulaciones que unen los brazos de un robot (prismáticas o angulares). A continuación, se realiza una breve descripción de todos ellos, valorándolos según su conveniencia para el proyecto propuesto. En la *Figura 1* se muestra un esquema de las diferentes configuraciones.

1.1 CADENA CINEMÁTICA ABIERTA

1. Robot Cartesiano (PPP)

Caracterizado por tres articulaciones prismáticas, orientadas normalmente según los tres ejes de coordenadas cartesianas. Utilizado para cargas elevadas con exigencias de precisión medio-altas. El volumen de trabajo teórico es L^3 .

- ❖ Ventajas: Complejidad de control baja, resolución constante independientemente del volumen de trabajo, precisión elevada.
- ❖ Inconvenientes: Volumen de trabajo pequeño, elementos fijos voluminosos que dificultan la maniobrabilidad.

2. Robot Cilíndrico (RPP)

Compuesto por dos articulaciones prismáticas y una articulación de rotación. Normalmente la articulación de rotación es la primera. El volumen de trabajo teórico es $3\pi L^3$.

- ❖ Ventajas: Velocidad máxima aumenta con la distancia al eje. Volumen de trabajo medio.
- ❖ Inconvenientes: Precisión disminuye con la distancia al eje, inercia variable, aumenta la complejidad del control

3. Robot Polar (RRP)

Se trata de una configuración con dos articulaciones de rotación, normalmente las dos primeras, y una articulación prismática. Como su nombre indica, el robot se posiciona según las coordenadas polares del espacio. El volumen teórico de trabajo es $(28/3)\pi L^3$.

- ❖ Ventajas: Accesibilidad a plano de la base y zonas por encima del eje 2, velocidad máxima elevada en el extremo del robot. Volumen de trabajo elevado.
- ❖ Inconvenientes: Precisión y resolución variables con la posición, inercia variable, complejidad de control.

4. Robot Angular (RRR)

En este caso se trata de una configuración con tres articulaciones de rotación. Las posiciones de las articulaciones se especifican en coordenadas angulares. El volumen teórico de trabajo es $(32/3)\pi L^3$.

- ❖ Ventajas: Gran accesibilidad, sobre todo a áreas cercanas a la base. Gran volumen de trabajo. Simplicidad constructiva
- ❖ Inconvenientes: Dificultad de control

5. Robot SCARA (RRP)

Este robot es una estructura derivada del robot polar, con variación del orden de las articulaciones prismáticas y de rotación. Está especialmente diseñado para operaciones de montaje en un plano perpendicular a su eje prismático. El volumen teórico de trabajo es $4\pi L^3$.

- ❖ Ventajas: Gran precisión y velocidad, la gravedad no influye en el control, baja inercia, control relativamente sencillo
- ❖ Inconvenientes: Limitada área de trabajo, limitación a tareas en planos perpendiculares a su eje prismático.

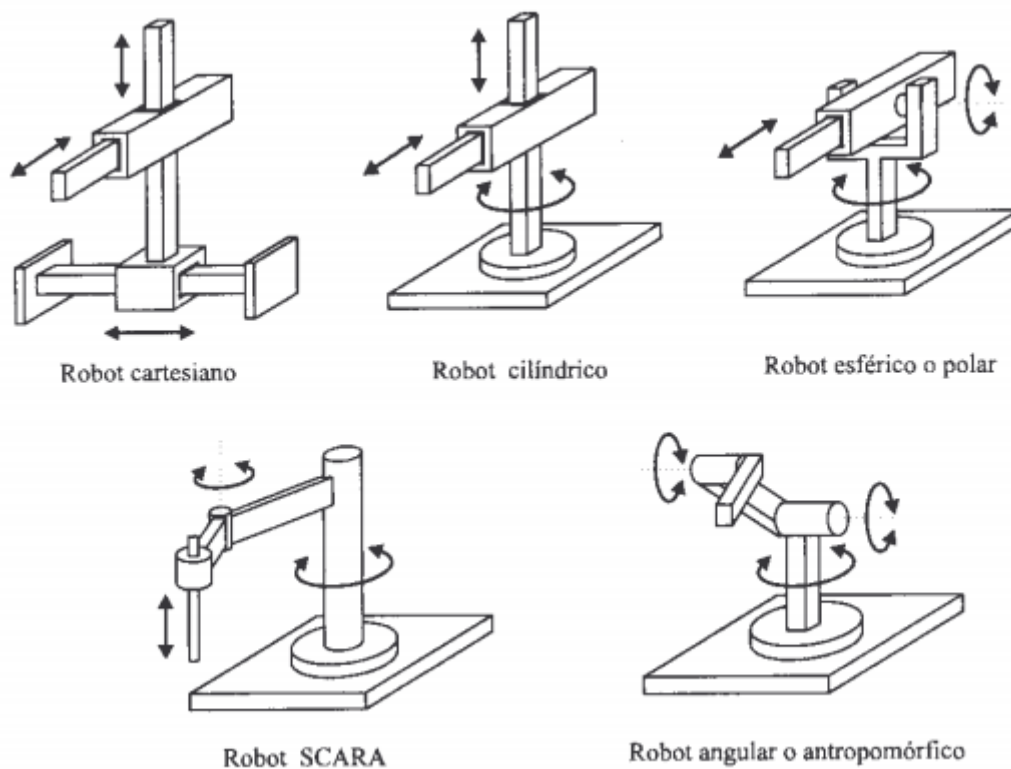


Figura 1. Configuraciones más frecuentes en Cadena Cinemática Abierta. (Ollero Baturone, 2001)

1.2 CADENA CINEMÁTICA CERRADA

1. Robot Paralelo

Por último, el Robot paralelo es una estructura compuesta por dos plataformas unidas por dos o más cadenas cinemáticas en paralelo, llamadas piernas. Este robot se caracteriza por formar una cadena cinemática cerrada, con articulaciones activas y pasivas. Su uso principal es el movimiento a gran velocidad y precisión (montaje de componentes pequeños), o la orientación en el espacio de grandes cargas (simuladores con pistones hidráulicos). En la *Figura 2* se muestra un diseño básico del mismo.

- ❖ Ventajas: Gran precisión y rigidez, elevada capacidad de carga, diseño mecánico sencillo.
- ❖ Inconvenientes: Espacio de trabajo limitado, singularidades cinemáticas complejas, gran complejidad de control.

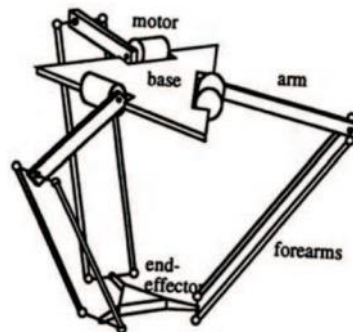


Figura 2. Robot Paralelo. (Ollero Baturone, 2001)

Tras definir las diferentes estructuras a considerar, se sintetizan las ventajas e inconvenientes de cada una en la *Tabla 1*.

TIPO	ESPACIO DE TRABAJO	PRECISIÓN	CONTROL	CONSTRUCCIÓN	VELOCIDAD
Cartesiano	Pequeña	Media	Sencillo	Sencillo	Baja
Cilíndrico	Media	Baja	Sencillo	Medio	Media
Polar	Grande	Baja	Medio	Medio	Media
Angular	Grande	Media	Complejo	Complejo	Alta
SCARA	Media	Alta	Medio	Medio	Alta
Paralelo	Media	Muy alta	Muy Complejo	Complejo	Muy alta

Tabla 1. Comparativa Tipos de Brazo Robótico

Debida a su elevado espacio de trabajo y su alta velocidad (conjugado con una precisión suficiente), unido a un control y construcción abordable, se escoge como opción a desarrollar un **Robot Angular con 5 Grados de Libertad**. Dentro de esta configuración, se presentan diferentes variantes, que serán estudiadas en secciones posteriores de este trabajo para elegir la más adecuada.

1.3 VARIANTES CONSTRUCTIVAS DE UN BRAZO ROBÓTICO ANGULAR CON 5 GRADOS DE LIBERTAD

1. Robot angular de planos coincidentes o paralelos

En el primer caso, los tres brazos del robot pertenecen al mismo plano. La principal ventaja es la no solicitación de los ejes de las articulaciones a flexión, mientras que la mayor desventaja son las restricciones de giro de las articulaciones por interferencia con otras partes del robot.

En el segundo caso los brazos del robot se construyen en planos paralelos, permitiendo así el giro de 360° de sus articulaciones. Es necesario tener en cuenta la solicitación a flexión de los ejes que unen los brazos. La *Figura 3* muestra las diferencias entre las dos configuraciones.

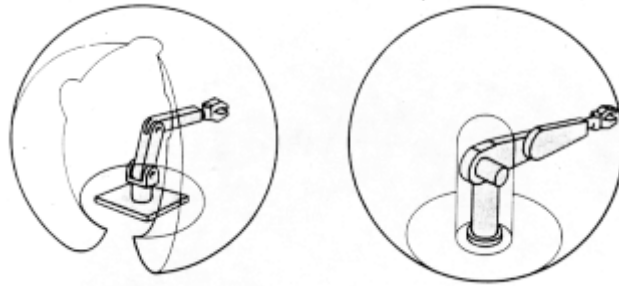


Figura 3. Robot planos coincidentes frente planos paralelos. (Ollero Baturone, 2001)

2. Compensación en gravedad o robot descompensado

La compensación en gravedad implica la introducción de contrapesos en los brazos 2 y 3 del Robot. De este modo, los motores que mueven dichos brazos sólo han de vencer la inercia de los mismos, y el robot se mantiene en una posición determinada sin necesidad de alimentación de los motores. Por otro lado, se aumenta la inercia de cada brazo al añadir masa y longitud a los mismos, aumentando así la solicitación de los motores. La *Figura 4* muestra ambos diseños en un modelo de robot ABB.

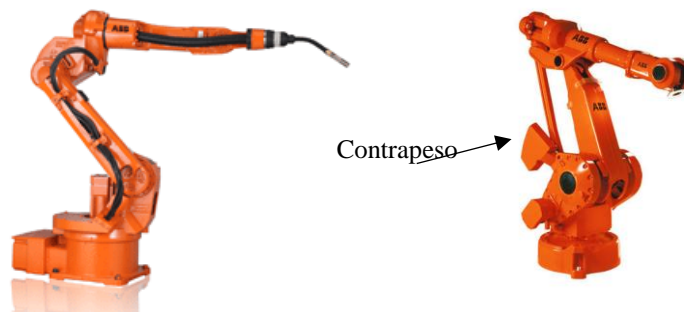


Figura 4. Robot ABB sin contrapeso y con contrapeso. (ABB, 2015)

3. Motores en las articulaciones o transmisión

La colocación de los motores en las articulaciones del Robot facilita el aspecto constructivo del mismo, pero implica una mayor solicitación de los motores 2 y 3, por aumentar el peso de la estructura en voladizo. Por otro lado, concentrar los motores en el brazo 1 (pilar central) disminuye la inercia total, pero aumenta la complejidad constructiva. La *Figura 5* muestra los tres posibles diseños (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007).

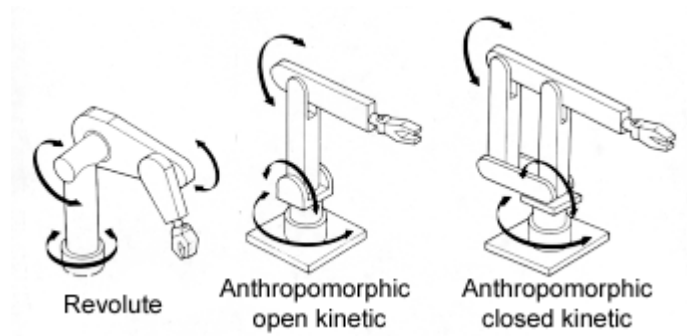


Figura 5. Colocación de motores en Robot Angular. (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007)

4. Robot angular con base fija o móvil

Una consideración adicional, dependiendo del Espacio de Trabajo a abarcar, es el montaje del Robot sobre una plataforma móvil, disminuyendo así las dimensiones de sus brazos. Sin embargo, la introducción de este elemento dificultaría el control y aumentaría enormemente la complejidad constructiva.

SECCIÓN 2. APROXIMACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO

El objetivo de esta sección es realizar una primera aproximación del espacio de trabajo del Brazo Robótico, para un correcto dimensionamiento posterior. Dicho espacio se determinará en función de las trayectorias descritas por una pelota de ping-pong tras el choque con una pared vertical. Los cálculos concretos realizados, así como el programa implementado en Matlab para realizarlos se indican en el *Anexo 1*.

Se toman las siguientes simplificaciones:

- ❖ Choque totalmente elástico, conservación de momento lineal
- ❖ Velocidad de la pelota comprendida entre 2 m/s y 3 m/s
- ❖ Ángulo de desviación entre -30 y +30 grados. Ángulo de inclinación entre 0 y 30 grados.
- ❖ No existe rozamiento con el aire
- ❖ El punto de impacto de la pelota con la pared vertical es un cuadrado de 30 cm de lado, situado a 1 m. de la horizontal, y centrado en la pared vertical.

En la *Figura 6* se indica la trayectoria de la pelota en una primera aproximación.

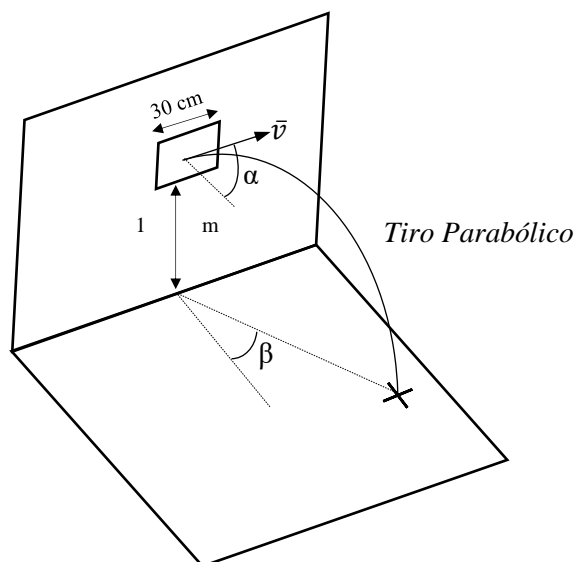


Figura 6. Aproximación de la trayectoria de la pelota

En esta primera aproximación, se supone un Área de Trabajo rectangular, con las dimensiones indicadas en la *Figura 7*.

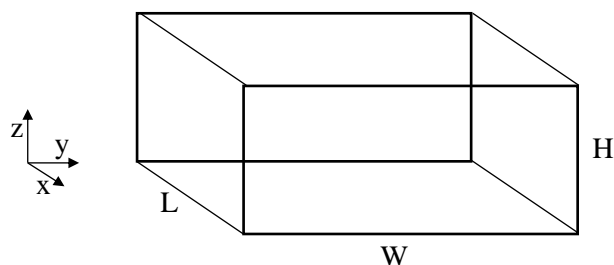


Figura 7. Primera aproximación Área de Trabajo

2.1 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO L

Para estimar la profundidad (L), se realizan diferentes simulaciones mediante el programa Matlab, variando tanto el ángulo de inclinación alfa, el ángulo de desviación beta y la velocidad de impacto. Se calcula el punto de impacto para cada caso, y se obtienen las distancias con respecto a la pared trasera, expresados en el eje x, indicadas en el *Gráfico 1*.

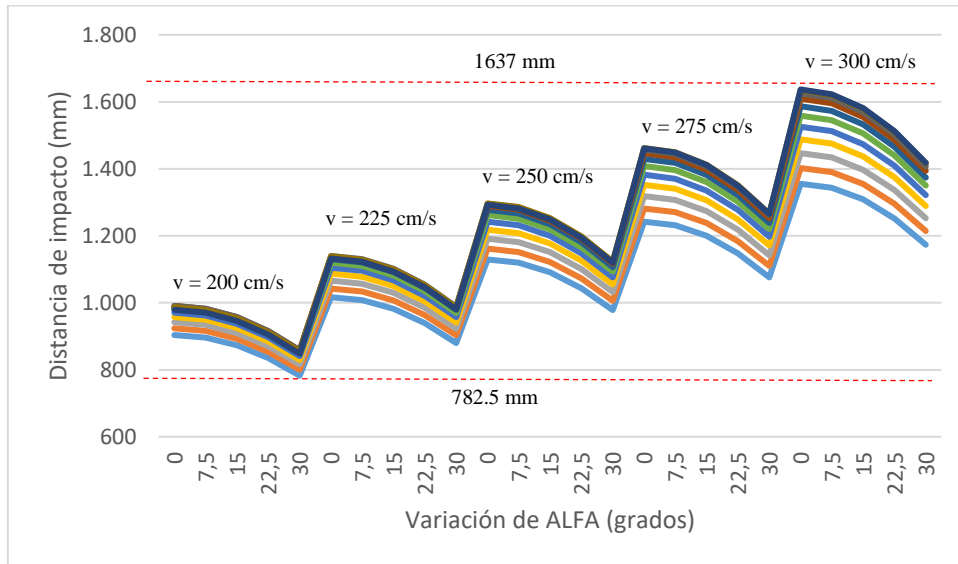


Gráfico 1. Distancia de impacto en el eje X

El punto más cercano a la pared se encuentra a 78,25 cm y el más alejado a 163,7 cm. Por tanto, se puede realizar una primera estimación de $L = 163,7 - 78,25 = 85,5$ cm.

2.2 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO W

En este caso, el único parámetro que influye en la anchura (W) es el ángulo de desviación beta. A partir de cálculos trigonométricos indicados en el *Anexo 1*, se calcula la trayectoria con máxima desviación con respecto al centro, y se estima $W = 137$ cm.

2.3 DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO H

Este parámetro no será definido hasta que se conozca la configuración real del Robot. No obstante, se estimará una altura de juego de $H = 30$ cm para realizar los primeros diseños.

SECCIÓN 3. DISEÑO INICIAL

En esta sección se describirá el primer modelo de Brazo Robótico realizado a partir de las especificaciones de partida. Se plantearán dos modelos constructivos, y se seleccionarán los motores necesarios para ello a partir de simulaciones dinámicas mediante el programa *Pro-Engineer*.

Como se ha indicado en *Sección 1*, se construirá un Brazo Robótico Angular, con 5 Grados de Libertad, similar al esquema que se indica en la *Figura 8*.

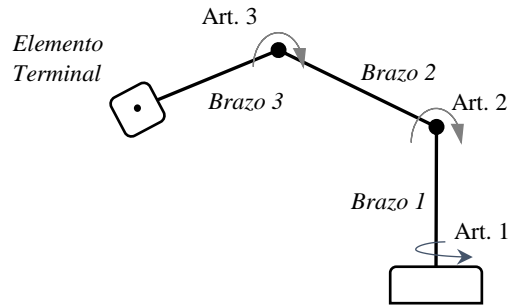


Figura 8. Esquema Básico Robot 5 Grados de Libertad

3.1 ESPECIFICACIONES DE PARTIDA

Partiendo de los resultados calculados en la *Sección 2*, se establecen las especificaciones de partida:

- ❖ Dimensiones de los brazos: Por motivos de depuración de los algoritmos de control, las distancias entre las articulaciones 2-3 y 3-punto de golpeo deberán ser iguales, formando el robot un triángulo isósceles con vértices la articulación 2, la articulación 3 y el punto de golpeo. En base a los cálculos para determinar el Espacio de Juego, se determinan las dimensiones de los brazos, con la condición de que se alcancen las cuatro esquinas finales del paralelepípedo que determina el Espacio de Juego desde el punto central, en el extremo opuesto. Con esto, se tiene que la dimensión buscada debe ser de **568 mm**. En la *Figura 9* se muestra un esquema con las dimensiones indicadas.

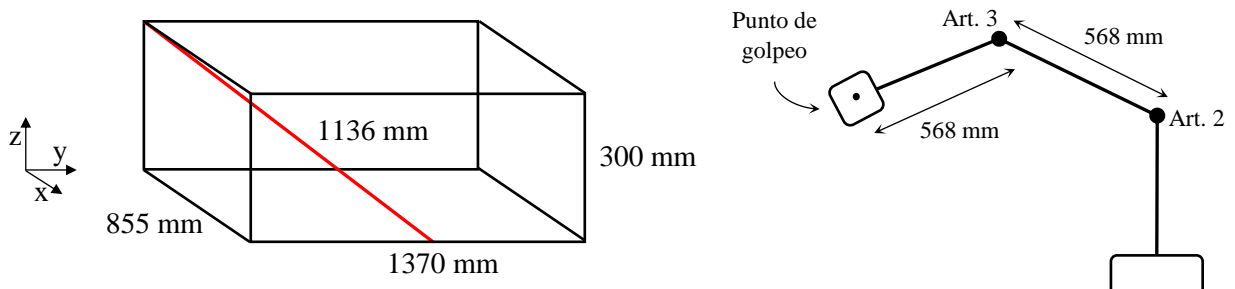


Figura 9. Esquema Longitud de Brazos 2 y 3

- ❖ Base fija en el centro de la mesa de juego: Debido a las dimensiones especificadas para los brazos, se hace innecesaria una base móvil. Este elemento añadiría complejidad tanto constructiva como de control, mientras que no aportaría ninguna ventaja adicional (puesto que el Espacio de Juego se cubre totalmente por el Brazo Robótico en posición fija).

- ❖ Configuración en planos paralelos: Se elige la configuración de brazos en planos paralelos (modelo Puma), frente a una configuración con todos los brazos coplanarios por un motivo principal. Mientras que la primera opción permite, en teoría, un giro de 360° en todas las articulaciones, lo que permite al Brazo Robótico cubrirse a sí mismo en caso de que la pelota lleve una trayectoria que intersecte con su Brazo 1, la segunda configuración restringe el giro de sus articulaciones para evitar la colisión de unas con otras.

- ❖ Elemento terminal con 2 Grados de Libertad: Puesto que la posición del elemento terminal se obtiene mediante los giros de las articulaciones 1, 2 y 3, el elemento terminal sólo ha de encargarse de la orientación de la pala. En este caso, debido a la finalidad del Brazo Robótico, es necesario orientar un plano, por lo que únicamente son necesarios dos grados de libertad para ello.

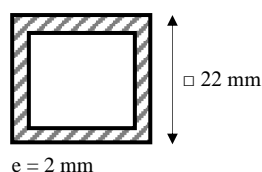
- ❖ Motores: Se ha optado por la elección de motores Paso a Paso modelo NEMA para las tres primeras articulaciones, y servomotores tipo FUTABA para la orientación del elemento terminal. Esto es debido al compromiso entre precisión y par requerido en cada articulación. En las articulaciones de posicionamiento, la solicitud de par requerida es mucho mayor que en las de orientación, por lo que son necesarios motores que ofrezcan mejores características en este aspecto, estos son los motores paso a paso. (Condit & Jones, 2015). Por el contrario, el aspecto importante en la orientación no es el par sino la precisión, así como la ligereza de los motores, por lo que se ha optado por dos servomotores.

3.2 DISEÑOS MEDIANTE PRO-ENGINEER. ELEMENTOS COMUNES A TODOS LOS DISEÑOS

A partir de estas dos especificaciones, se realizan dos diseños. Un primer Brazo no equilibrado, con los motores en las articulaciones, y un segundo diseño equilibrado, con contrapesos. Para las dos configuraciones, se realizarán varias suposiciones iniciales, que se irán desarrollando en posteriores secciones según los requerimientos constructivos y decisiones que se vayan tomando. Estas son:

a. Perfil de los brazos 2 y 3

Se ha optado por un perfil cuadrado hueco como el que se indica a continuación.



b. Materiales

Debido a su gran relación Resistencia / Peso, se escoge el Aluminio para los tres brazos del Robot. Por su parte, el elemento terminal se realizará previsiblemente en PVC, por su diseño más complejo. Por último, la pala se construirá en lámina de madera contrachapada.

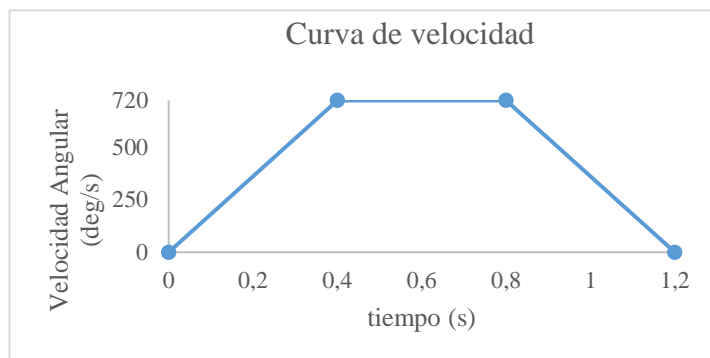
c. Motores

En un primer momento, se seleccionan los siguientes motores para cada articulación (*Tabla 2*), si bien la decisión variará en posteriores diseños para cumplir los requerimientos de Par necesarios. En el *Anexo 7* se incluye la hoja de características de los motores escogidos (Automation Direct, 2015).

ARTICULACIÓN	MOTOR ESCOGIDO
Articulación 1	NEMA 23079
Articulación 2	NEMA 23055
Articulación 3	NEMA 17048
Articulación 4	FUTABA 3003
Articulación 5	FUTABA 3111

Tabla 2. Relación Motores y Articulaciones

Asimismo, para la realización de análisis dinámicos, se considera el perfil trapezoidal de velocidad de los motores indicado en el *Gráfico 2*, atendiendo a criterios de velocidad de la pelota y tiempo de reacción.



Velocidad Máxima: 720 deg/seg (2rps)
Aceleración máxima: 1800 deg/seg² (5 rps²)
Tiempo aceleración: 0.4 seg
Tiempo Velocidad Máxima: 0.4 seg

Gráfico 2. Perfil de velocidad de los motores

d. Configuración del elemento terminal

Como se ha comentado anteriormente, solamente son necesarios dos giros para orientar el plano de la pala en la posición de golpeo. Por lo tanto, dicho elemento se compondrá de dos motores, con ejes de giro que se cortan en un punto. Se escoge un diámetro de pala de 100 mm.

3.3 BRAZO ROBÓTICO RRR NO EQUILIBRADO

En la *Figura 10*, se muestra un primer diseño del brazo robótico. Se observa que está compuesto por dos brazos suspendidos sobre un pilar, con un elemento terminal en forma de pala que, tras consultar diversas fuentes bibliográficas (Ur-Rehmann, Caro, Chablat, & Wenger, 2009) (Bai & Hansen, 2007), se ha diseñado como se indica en dicha figura. En este caso, los motores se han colocado en los ejes de las articulaciones.

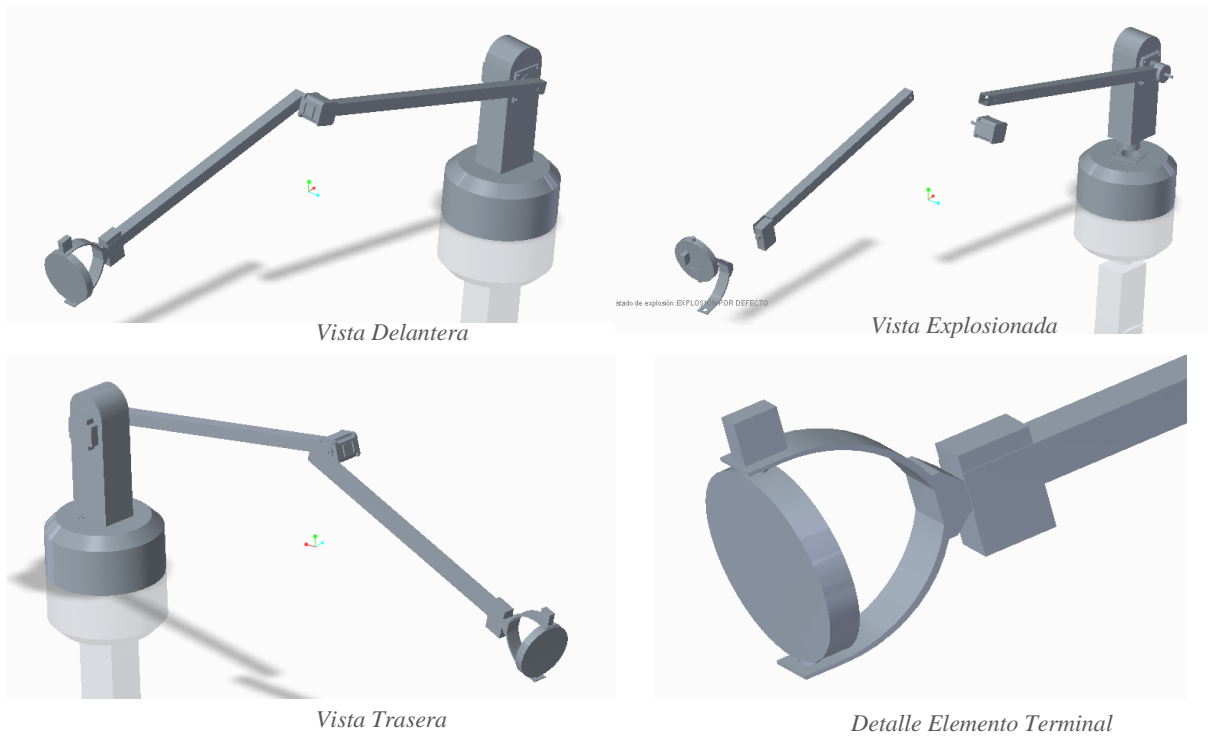


Figura 10. Brazo Robótico RRR No Equilibrado

Tras el diseño 3D, se procede a realizar un análisis dinámico de los momentos involucrados en cada eje del Brazo, al aplicar a cada uno la curva de velocidad descrita anteriormente. Para ello, se escogerá como posición inicial del brazo aquella que presente mayor inercia en cada movimiento. Esto es: totalmente extendido en horizontal para calcular el par en el eje 1, y giro simultaneo y contrario en eje 2 y 3 para calcular el par en el eje 2. Posteriormente, se elige el motor más adecuado para cada eje, en base a las especificaciones de cada motor indicadas en el *Anexo 7*.

En aquellos ejes en que el par máximo del motor no sea suficiente, se planteará el uso de una reductora. Sin embargo, la introducción de una reductora implica una mayor velocidad de los motores, por lo que disminuye su par como se puede ver en las curvas de par del *Anexo 7*. Por tanto, será necesario encontrar la combinación de par y velocidad que permita alcanzar las especificaciones.

Los resultados obtenidos en el análisis dinámico se indican en la *Tabla 3*:

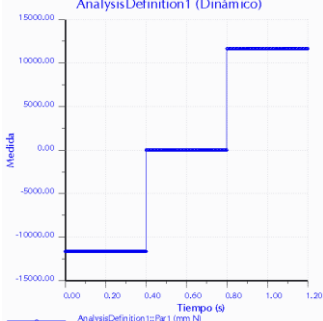
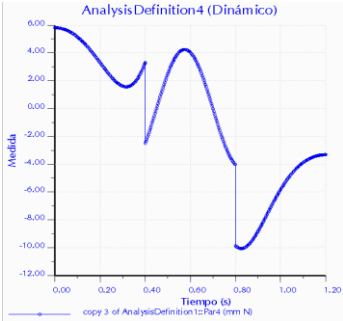
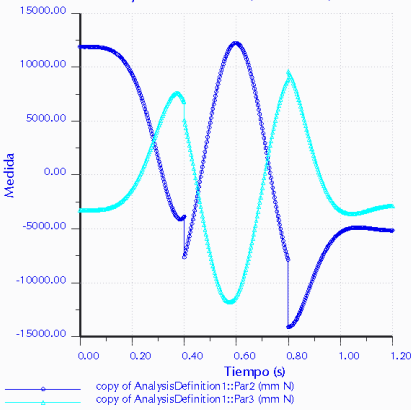
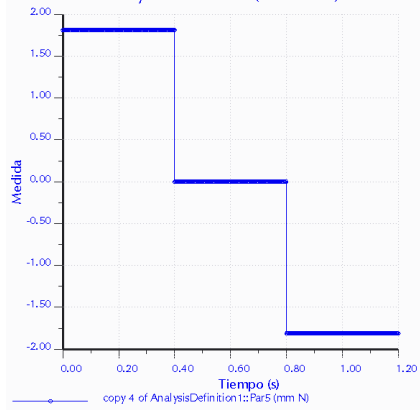
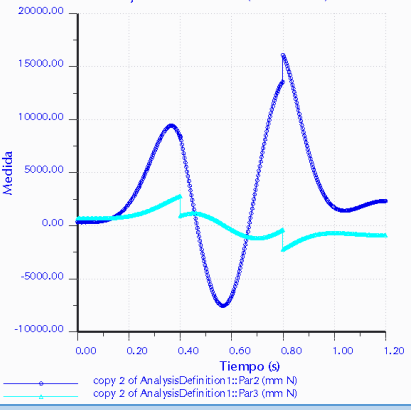
Eje	Curva de Par	Eje	Curva de Par
1	 <p style="text-align: center;">Par 1 máximo = 11656 Nmm</p>	4	 <p style="text-align: center;">Par 4 máximo = 10 Nmm</p>
2	 <p style="text-align: center;">Par 2 máximo = 14075 Nmm Par 3 máximo = 11770 Nmm</p>	5	 <p style="text-align: center;">Par 5 máximo = 1.81 Nmm</p>
3	 <p style="text-align: center;">Par 2 máximo = 13485 Nmm Par 3 máximo = 2737 Nmm</p>		

Tabla 3. Gráficas de Par. Primer diseño

A continuación, se escogen los motores necesarios y se calculan las posibles reductoras. En la *Tabla 4* se muestran los resultados obtenidos.

Motor Escogido	Par Máximo (Nmm)	Par Motor (Nmm)	Reductora	Velocidad Motor (rpm)	Par2 (Nmm)	Par Reductora
NEMA 23079 Art. 1	11656	1900	6,13	736,17	400	2453,89
NEMA 34066 Art. 1	11656	2750	4,24	508,63	250	1059,64
NEMA 23055 Art. 2	14075	950	14,82	1777,89	180	2666,84
NEMA 23079 Art. 2	14075	1900	7,41	888,95	350	2592,76
NEMA 17048 Art. 3	11770	450	26,16	3138,67	50	1307,78
FUTABA 3003 Art. 4	10	32	0,31			
FUTABA s3111 Art. 5	1,81	6	0,30			

Tabla 4. Cálculos de Par. Brazo Robótico RRR No Equilibrado

Como se puede observar, únicamente se satisfacen los pares de las articulaciones 4 y 5, mediante dos servomotores tipo FUTABA. En cuanto a los motores de las articulaciones 1, 2 y 3, sería necesario una reductora demasiado grande, lo que implica una velocidad de motor elevada, que va asociada a un par mucho menor que el nominal. Los pares obtenidos con esta solución son alrededor de un orden de magnitud inferior a los deseados.

Este diseño queda por tanto descartado, al no cumplirse las especificaciones de velocidad y par necesarias para el objetivo final. Sí que es válido el diseño de la muñeca, por lo que se continuará con él para posteriores simulaciones.

3.4 BRAZO ROBÓTICO RRR EQUILIBRADO

Para intentar disminuir los pares obtenidos en las articulaciones 1, 2 y 3, se opta por un diseño compensado en gravedad, de manera que los motores de las articulaciones 2 y 3 estén menos solicitados. En el *Anexo 2* se explicitan los cálculos de los contrapesos necesarios para cada brazo. A continuación, en la *Figura 11*, se muestra el diseño 3D del Brazo Equilibrado, donde se pueden apreciar los contrapesos en los brazos 2 y 3.

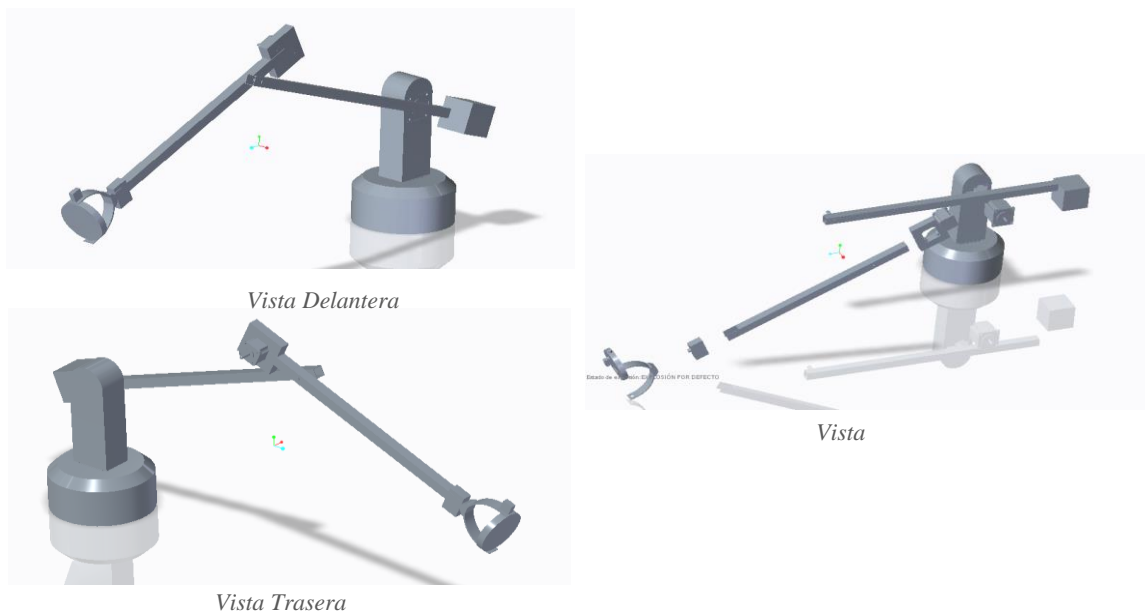


Figura 11. Brazo Robótico RRR Equilibrado

Realizando las mismas simulaciones que en el caso de Brazo no Equilibrado, obtenemos los siguientes resultados (Tabla 5) de Par necesario para cada articulación.

Eje	Curva de Par	Eje	Curva de Par
1	<p>AnalysisDefinition1 (Dinámico)</p> <p>Par 1 máximo = 14500 Nmm</p>	4	<p>AnalysisDefinition4 (Dinámico)</p> <p>Par 4 máximo = 10 Nmm</p>
2	<p>AnalysisDefinition2 (Dinámico)</p> <p>Par 2 máximo = 16700 Nmm</p>	5	<p>AnalysisDefinition5 (Dinámico)</p> <p>Par 5 máximo = 1.81 Nmm</p>
3	<p>AnalysisDefinition3 (Dinámico)</p> <p>Par 3 máximo = 1735 Nmm</p>		

Tabla 5. Gráficas de Par. Segundo diseño

Posteriormente, se escogen los motores necesarios y se calculan las posibles reductoras. Se explicitan los resultados en la *Tabla 6*.

Motor escogido	Par Máximo (Nmm)	Par Motor (Nmm)	Reductora	Velocidad Motor (rpm)	Par2 (Nmm)	Par Reductora
NEMA 23079 Art. 1	14500	1900	7,63	915,79	400	3052,63
NEMA 34066 Art. 1	14500	2750	5,27	632,73	250	1318,18
NEMA 23055 Art. 2	16700	950	17,58	2109,47	180	3164,21
NEMA 23079 Art. 2	16700	1900	8,79	1054,74	400	3515,79
NEMA 17048 Art. 3	1735	450	3,86	462,67	400	1542,22
FUTABA 3003 Art. 4	10	32	0,31			
FUTABA s3111 Art. 5	1,81	6	0,30			

Tabla 6. Cálculos de Par. Brazo Robótico RRR Equilibrado

En este caso, se puede observar una mejoría en la articulación 3, pues se alcanza prácticamente el Par Motor requerido mediante una reductora 3,86:1. Sin embargo, los pares motores en las articulaciones 1 y 2 aumentan considerablemente, debido al aumento de peso del Brazo Robótico al incluir los contrapesos. Las articulaciones 4 y 5 no se ven afectadas por la modificación.

Este diseño queda también descartado, siendo necesario un nuevo planteamiento.

SECCIÓN 4. MODIFICACIONES AL DISEÑO INICIAL

En esta sección se describirán las modificaciones realizadas al Brazo Robótico en la segunda fase de diseño, que permitirán cumplir con las especificaciones de Velocidad de Giro y Par, indicadas como requerimientos de partida.

4.1 DISMINUCIÓN DEL TAMAÑO

Tras analizar los resultados obtenidos en la Sección anterior, se ha comprobado que, tanto en el Brazo equilibrado como el No equilibrado los motores elegidos no dan el Par Motor necesario, siendo este un orden de magnitud inferior al requerido. Se procede a analizar las componentes que intervienen en el Par Motor, siendo esta su formulación (Bajd, Mihelj, Lenarcic, Stanovnic, & Munih, 2010):

$$M_{motor} \sim (M_i + r_{CM} \times (Peso + F_i) + F_{enlace}) \sim \\ \sim -I \cdot \varepsilon + r_{CM} \times (m_{sólido}g - m_{sólido}a_{sólido}) + F_{enlace}$$

Se observa una fuerte dependencia del Momento Motor con la inercia del sólido (relacionada con el Momento de Inercia), y con la distancia del eje de giro al centro de masas (relacionado con el momento que ejerce el Peso y Fuerza de Inercia). A raíz de ello, se propone disminuir el tamaño del Brazo para, por una parte, disminuir su Momento de Inercia, y por otra reducir el momento producido por la Fuerza de Inercia y el Peso.

Por tanto, manteniendo las longitudes iguales entre los ejes 2-3 y 3-5, se realiza una reducción de su tamaño de acuerdo al siguiente criterio. La longitud final del Brazo totalmente extendido podrá alcanzar los laterales del Espacio de Trabajo, colocándose éste en el centro de la misma. Con esto, se tiene que la dimensión buscada debe ser de **342,5 mm**. En la *Figura 12* se indica un esquema del Brazo Robótico con las nuevas dimensiones.

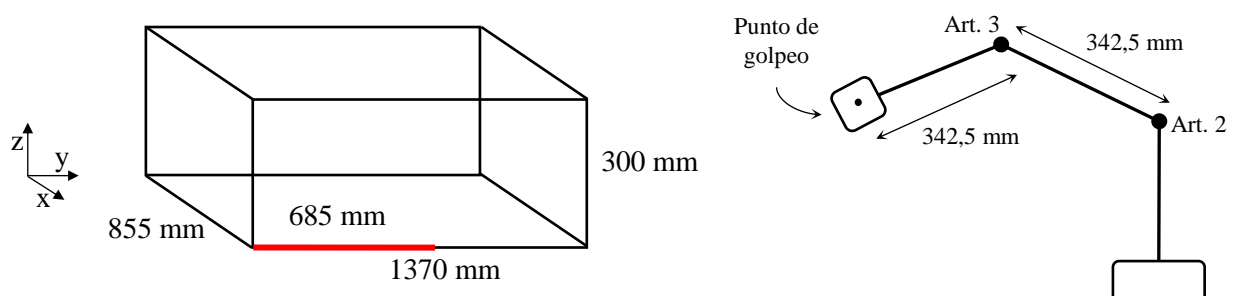


Figura 12. Esquema Longitud de Brazos 2 y 3 en Brazo Reducido

A continuación, en la *Figura 13*, se muestra el diseño escogido. Se ha optado por el modelo de Brazo Equilibrado, por ser éste el que menores pares motores solicitaba en las anteriores simulaciones. Para ello, se han recalculado los contrapesos teniendo en cuenta las nuevas longitudes de los brazos.

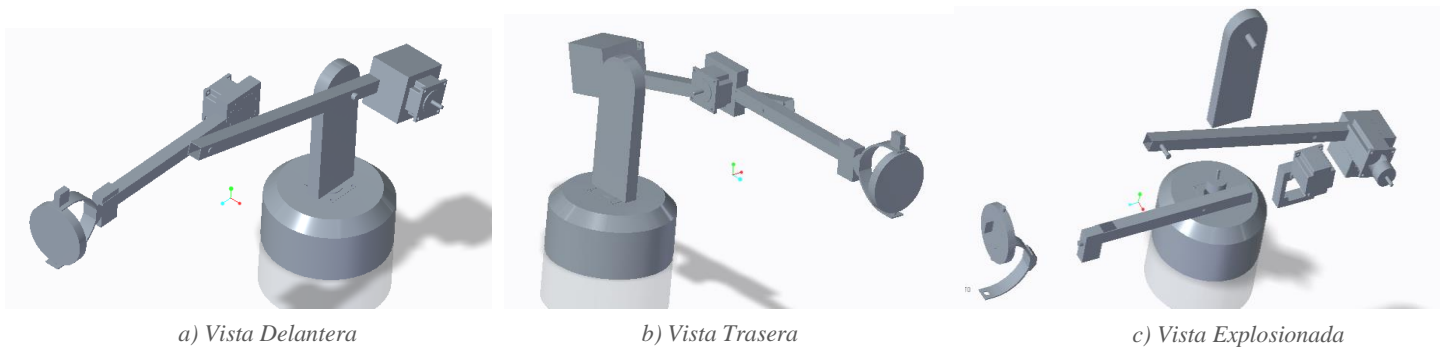


Figura 13. Brazo Robótico Equilibrado de dimensiones reducidas

Como en los diseños anteriores, se realiza un análisis de Par en cada eje con los siguientes resultados (Tabla 7):

Eje	Curva de Par	Eje	Curva de Par
1	<p>AnalysisPar1 (Dinámico)</p>	4	<p>AnalysisDefinition4 (Dinámico)</p>
	<p>Par 1 máximo = 5798 Nmm</p>		<p>Par 4 máximo = 10 Nmm</p>
2	<p>AnalysisPar2 (Dinámico)</p>	5	<p>AnalysisDefinition5 (Dinámico)</p>
	<p>Par 2 máximo = 6900 Nmm Par 3 máximo = 2900 Nmm</p>		<p>Par 5 máximo = 1.81 Nmm</p>
3	<p>AnalysisPar3 (Dinámico)</p>		
	<p>Par 2 máximo = 3500 Nmm Par 3 máximo = 1200 Nmm</p>		

Tabla 7. Gráficas de Par. Tercer diseño

Los motores escogidos, con sus correspondientes reductoras, se especifican en la *Tabla 8*.

Motor Escogido	Par Máximo (Nmm)	Par Motor (Nmm)	Reductora	Velocidad Motor (rpm)	Par2 (Nmm)	Par Reductora
NEMA 23079 Art. 1	5800	1900	3,05	366,32	1250	3815,79
NEMA 34066 Art. 1	5800	2750	2,11	253,09	1750	3690,91
NEMA 23055 Art. 2	6900	950	7,26	871,58	400	2905,26
NEMA 23079 Art. 2	6900	1900	3,63	435,79	1150	4176,32
NEMA 23055 Art. 3	2900	950	3,05	366,32	750	2289,47
FUTABA 3003 Art. 4	10	32	0,31			
FUTABA s3111 Art. 5	1,81	6	0,30			

Tabla 8. Cálculos de Par. Brazo Robótico RRR Equilibrado Pequeño

Se observa que los Pares obtenidos son mucho menores que con las anteriores simulaciones, si bien es cierto que los motores disponibles no alcanzan el Par Máximo solicitado (excepto en las articulaciones 4 y 5). Sin embargo, el Par obtenido en la articulación 3 es muy similar al necesario. En el caso de las articulaciones 1 y 2, el Par obtenido sigue siendo demasiado inferior al necesario.

Por este motivo, se propone otro rediseño del Brazo, para intentar disminuir la carga solicitada a los motores 1 y 2. Esto se realizará mediante la disminución de la Inercia del Brazo, concentrando el peso entorno al eje 1.

4.2 BRAZO ROBÓTICO CON TIRANTE

El diseño que se presenta a continuación busca concentrar el peso de la estructura en torno al eje 1, y reducir al máximo el peso y la inercia de cada brazo. Para ello, se ha prescindido de los contrapesos de las barras, y en su lugar se han colocado los motores de los ejes 2 y 3 en la parte superior del brazo 1. Esto implica la introducción de un tirante que traslade el giro del motor 3 al eje 3.

Además, en una primera aproximación se ha montado el motor 3 solidario al brazo 2, para que el giro del brazo 3 sea absoluto respecto a la base, y no relativo al brazo 2. En la *Figura 14* se presentan algunas vistas del diseño realizado.

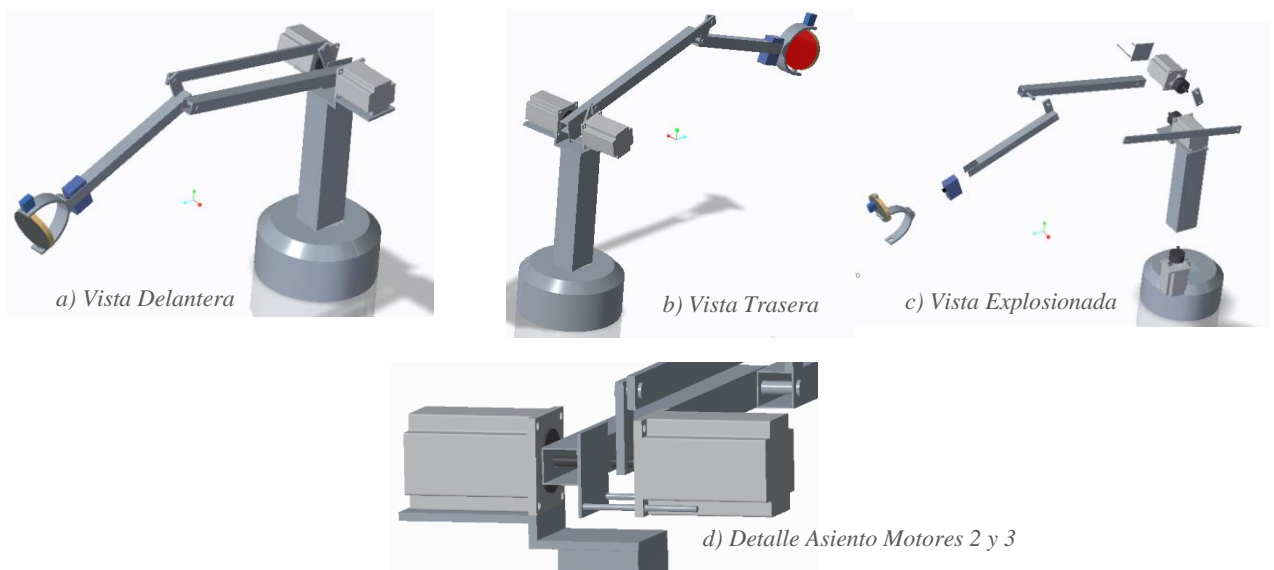


Figura 14. Brazo Robótico con Tirante

Los resultados de Par solicitado en cada eje son los siguientes (Tabla 9):

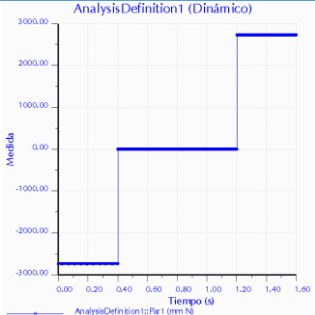
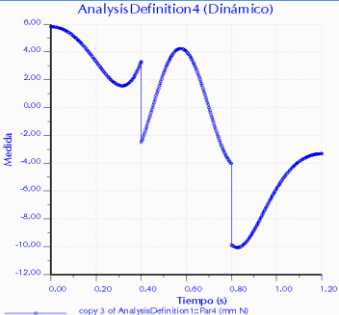
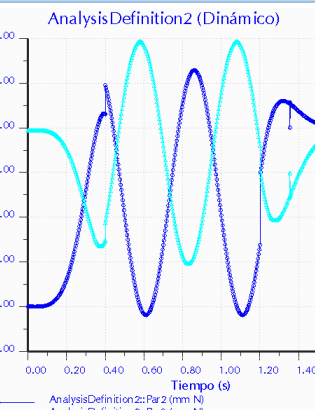
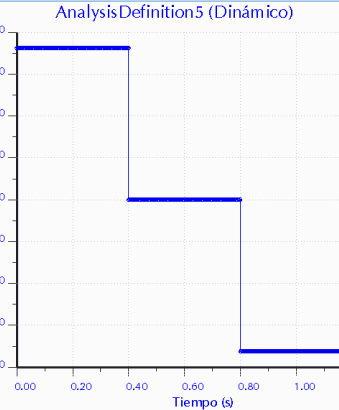
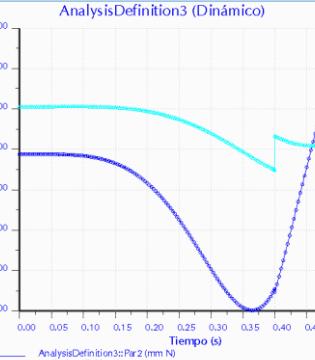
Eje	Curva de Par	Eje	Curva de Par
1	 <p>AnalysisDefinition1 (Dinámico)</p> <p>Par 1 máximo = 2900 Nmm</p>	4	 <p>AnalysisDefinition4 (Dinámico)</p> <p>Par 4 máximo = 10 Nmm</p>
2	 <p>AnalysisDefinition2 (Dinámico)</p> <p>Par 2 máximo = 3200 Nmm Par 3 máximo = 2900 Nmm</p>	5	 <p>AnalysisDefinition5 (Dinámico)</p> <p>Par 5 máximo = 1.81 Nmm</p>
3	 <p>AnalysisDefinition3 (Dinámico)</p> <p>Par 2 máximo = 2500 Nmm Par 3 máximo = 750 Nmm</p>		

Tabla 9. Gráficas de Par. Cuarto diseño

A continuación, se escogen los motores necesarios y se calculan las posibles reductoras, indicadas en la *Tabla 10*.

Motor Escogido	Par Máximo* (Nmm)	Par Motor (Nmm)	Reductora	Velocidad Motor (rpm)	Par2 (Nmm)	Par Reductora
NEMA 23079 Art. 1	2900	1900	1,53	183,16		0,00
NEMA 34066 Art. 1	2900	2750	1,05	126,55	2800	2952,73
NEMA 23055 Art. 2	3200	950	3,37	404,21	720	2425,26
NEMA 23079 Art. 2	3200	1900	1,68	202,11	1800	3031,58
NEMA 23055 Art. 3	2900	950	3,05	366,32	750	2289,47
NEMA 23079 Art. 3	1900	1900	1	120	1900	1900
FUTABA 3003 Art. 4	10	32	0,31			
FUTABA s3111 Art. 5	1,81	6	0,30			

Tabla 10. Cálculos de Par. Brazo Robótico con Tirante. Giro Relativo

* Considerando únicamente un rango de giro de 0 a 180°, debido a restricciones impuestas por el sistema de control.

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que todos los motores escogidos, excepto el del eje 2, cumplen con los requerimientos de Par Máximo. Además, no es necesario el uso de reductoras en ninguno de ellos. En cuanto al eje 2, será necesaria una pequeña modificación para conseguir alcanzar el par máximo.

SECCIÓN 5. REDISEÑO CONSTRUCTIVO

En esta sección se realizarán las modificaciones necesarias al Brazo Robótico diseñado previamente, con objeto de simplificar su posterior construcción. También se abordará el problema de falta de Par Motor en el eje 2, mencionado anteriormente.

5.1 ALOJAMIENTOS DE LOS MOTORES

Una vez definida la estructura principal, es necesario diseñar de forma exacta los alojamientos en los que se fijarán los motores. A continuación, se mostrará la alternativa usada para cada uno de ellos, explicando brevemente el motivo de la solución escogida.

Motor NEMA 34066 en Eje 1

En este caso, se ha optado por insertar el Motor en la Bancada. Esta consiste en una chapa metálica, sobre la que se mecaniza un agujero y se fija el Estator del motor mediante cuatro tornillos, por la parte superior. Asimismo, la colocación del motor se encuentra a una distancia del eje de giro, por lo que será necesario incorporar una transmisión que se explicará más adelante. Esto es así debido a la necesidad de la incorporación de rodamientos que soporten la carga axial de la estructura, y que alineen el eje 1. En la *Figura 15* se muestran algunas vistas del motor en su alojamiento definitivo.

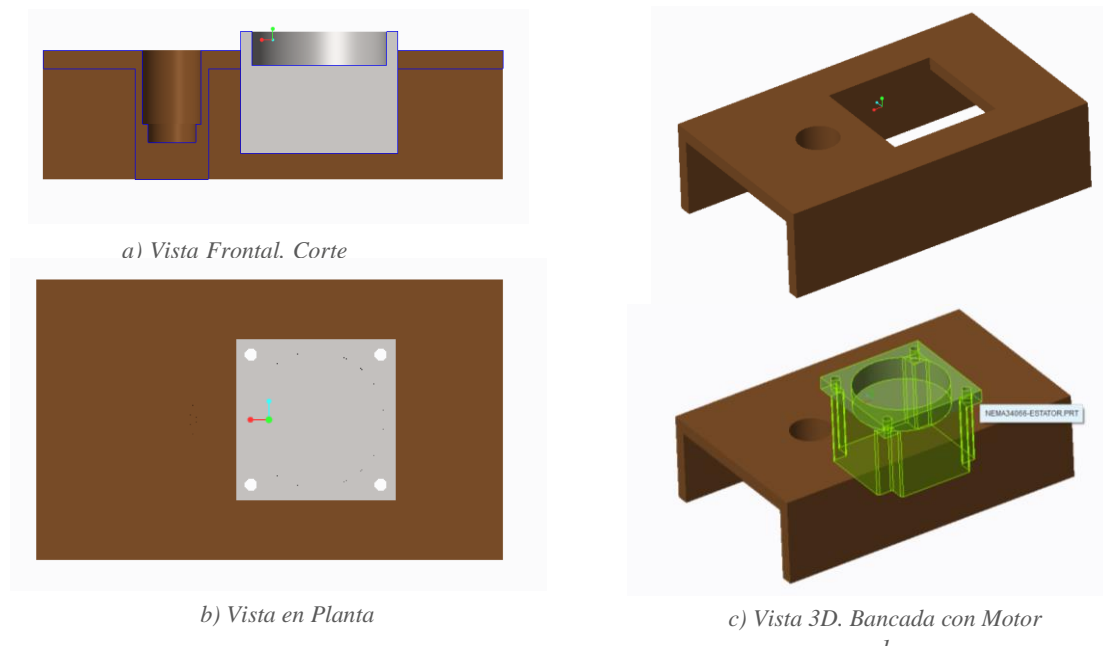


Figura 15. Alojamiento Motor 1

Motor NEMA 23077 en Eje 2

Para facilitar la construcción, se ha simplificado el alojamiento de los motores 2 y 3 previamente diseñado, y se ha sustituido por una placa de aluminio perforado de 5 mm. de espesor. Puesto que en el eje 2 será necesaria una transmisión, los agujeros de sujeción del motor están descentrados respecto al plano principal de la placa. Se presenta en la *Figura 16* el diseño y colocación del mismo.

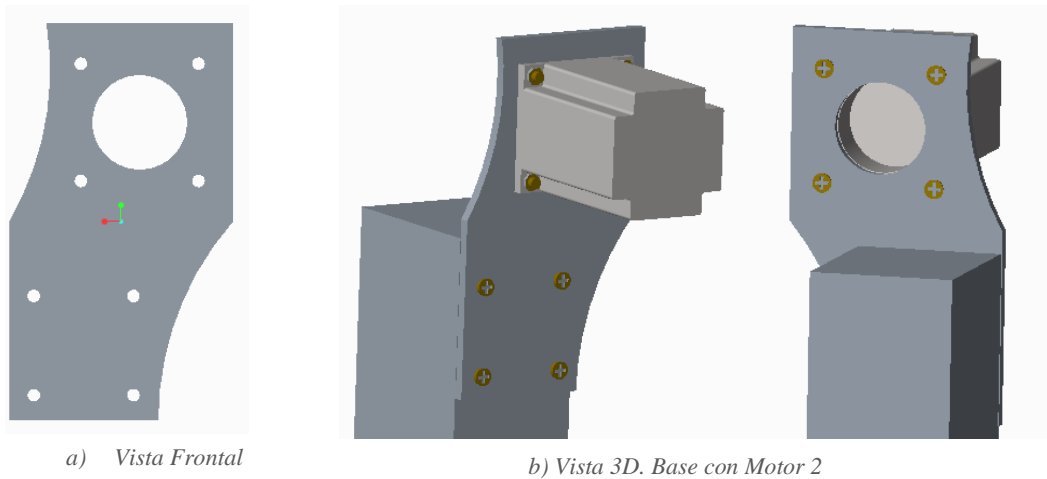


Figura 16. Alojamiento Motor 2

Motor NEMA 23077 en Eje 3

En un primer momento, se ha planteado que el motor del eje 3 sea solidario al brazo 2, para que el giro del eje 3 no dependa del giro en el eje 2. Esto implica una mayor sollicitación del motor 2, que no es capaz de proporcionar el Par necesario para las especificaciones. Por tanto, se propone una variación en el diseño, que simplifica también el aspecto constructivo, en el que el motor del eje 3 esté fijo en el brazo 1, en vez de en el brazo 2. El diseño realizado se muestra en la *Figura 17*.

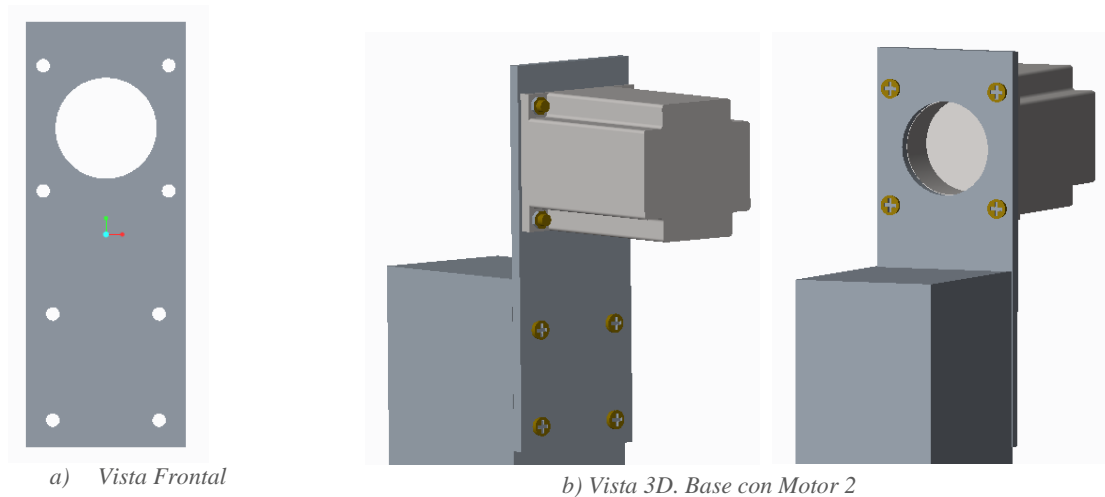


Figura 17. Alojamiento Motor 3

Será necesario comprobar que se alcanzan las sollicitaciones en todos los motores, por lo que se realizará una nueva simulación mediante *Pro-Engineer*. En la *Tabla 11* se muestran los resultados obtenidos con este nuevo diseño.

Motor Escogido	Par Máximo (Nmm)	Par Motor (Nmm)	Reductora	Velocidad Motor (rpm)	Par2 (Nmm)	Par Reductora
NEMA 23079 Art. 1	2910	1900	1,53	183,79		0,00
NEMA 34066 Art. 1	2910	2750	1,06	126,98	2700	2857,09
NEMA 23055 Art. 2	2254	950	2,37	284,72		0,00
NEMA 23079 Art. 2	2254	1900	1,19	142,36	1900	2254,00
NEMA 23055 Art. 3	1228	1700	0,72	86,68	900	650,12
FUTABA 3003 Art. 4	10	32	0,31			
FUTABA s3111 Art. 5	1,81	6	0,30			

Tabla 11. Cálculos de Par. Brazo Robótico con Tirante. Giro Absoluto

Como se puede observar, el motor en la articulación 2 está menos solicitado, debido a la eliminación del peso y el momento de reacción del motor 3. Con esta configuración, por tanto, se cumplen todos los requisitos de Par marcados por las especificaciones de velocidad.

Motor Futaba 3003 en Eje 4

Para la sujeción del Motor en el eje 4, se proponen dos diseños iniciales. En el primero, se emplean dos escuadras fijas al extremo del brazo 2, que sujetan el servomotor mediante cuatro tornillos, aprovechando los agujeros que incorpora en su carcasa. Para el segundo diseño, se realiza un marco en aluminio que permite sujetar la carcasa del motor al brazo mediante dos escuadras. Finalmente se escoge la segunda opción, por ser ésta una sujeción más rígida, que evita la desalineación del eje motor con el brazo y no carga en exceso las patillas de sujeción de la carcasa del motor. En la *Figura 18* se muestran las dos opciones consideradas.

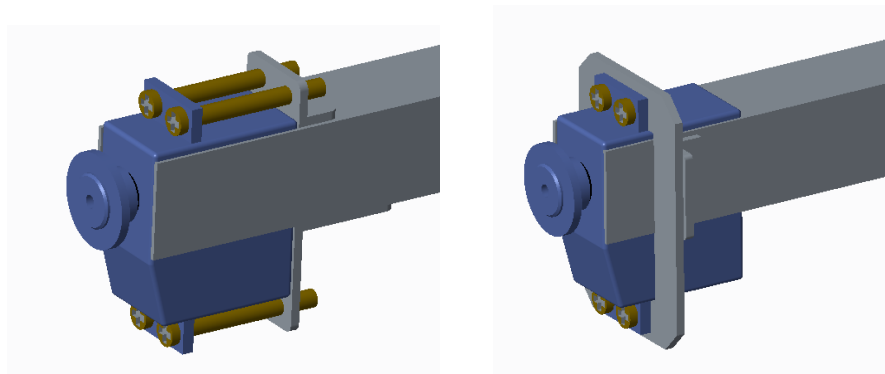


Figura 18. Alojamiento Motor 4

Motor Futaba 3111 en Eje 5

Por último, para el caso del motor del eje 5, se propone el diseño indicado en la *Figura 19*. Como se puede observar, se fija el eje del motor mediante un aspa al elemento intermedio de la muñeca, mientras que la carcasa del motor se fija a la pala mediante dos tornillos, aprovechando los agujeros que incorpora su carcasa. Se ha escogido este diseño porque, aunque es menos convencional que la fijación del eje motor al elemento que gira, permite un montaje más sencillo de todos los componentes.

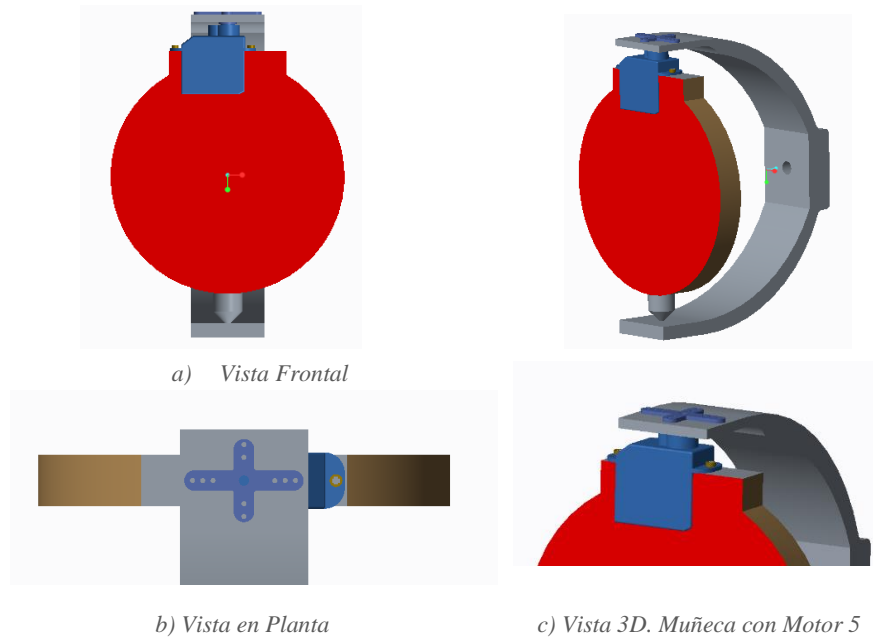


Figura 19. Alojamiento Motor 5

5.2 ALOJAMIENTOS DE LOS RODAMIENTOS

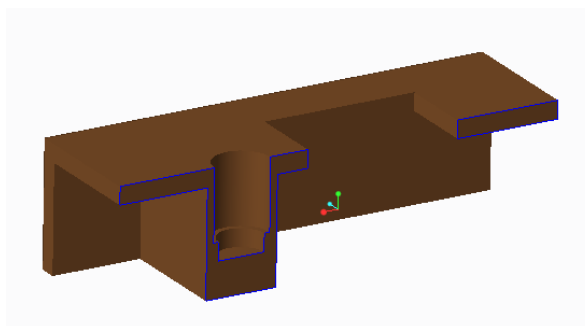
Se ha considerado necesaria la introducción de rodamientos en los ejes de giro por dos motivos principales: alineación de los ejes y disminución del rozamiento entre las diferentes partes móviles de la estructura.

En primer lugar, se han escogido los diferentes rodamientos para cada eje, de acuerdo a las fuerzas que intervienen en los mismos, calculadas a partir de las simulaciones realizadas. En el *Anexo 3* se indican los cálculos realizados (Serrano Nicolás, 2013). La elección se indica en la *Tabla 12*.

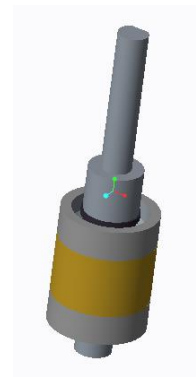
Eje	Rodamiento escogido		
	Referencia	Tipo	Número
1	NSK 7201BEAT85	Bolas de Contacto Angular	2
2	608ZZ	Radial de Bolas	2
3	624ZZ	Radial de Bolas	2
6	624ZZ	Radial de Bolas	1
7	624ZZ	Radial de Bolas	1

Tabla 12. Elección de Rodamientos

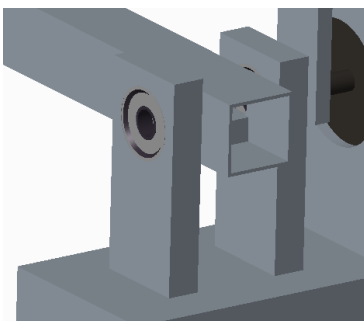
Una vez escogidos los rodamientos, se diseñan los alojamientos para cada uno de ellos, bajo la condición de sencillez constructiva. En la *Figura 20* se muestran los diseños realizados para cada eje.



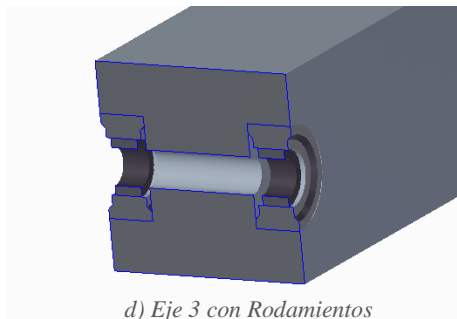
a) Alojamiento Eje 1 en Bancada



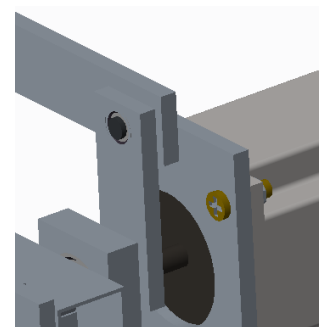
b) Eje 1 con Rodamientos



c) Eje 2 con Rodamientos



d) Eje 3 con Rodamientos



e) Eje 7 con Rodamientos

Figura 20. Alojamiento de los diferentes Rodamientos

A continuación, se indica con mayor detalle el diseño del eje 1, por ser de mayor complejidad. Dicho eje debe absorber tanto las cargas radiales como las axiales, y debe estar totalmente perpendicular a la bancada. Es por ello que se han escogido dos rodamientos de bolas de contacto angular, dispuestos como se indica en la vista de sección de la *Figura 21*. Ambos rodamientos se fijan al eje (pista interior) y a la bancada (pista exterior) con ayuda de dos casquillos, dos tuercas y un resalte en la parte superior del eje.

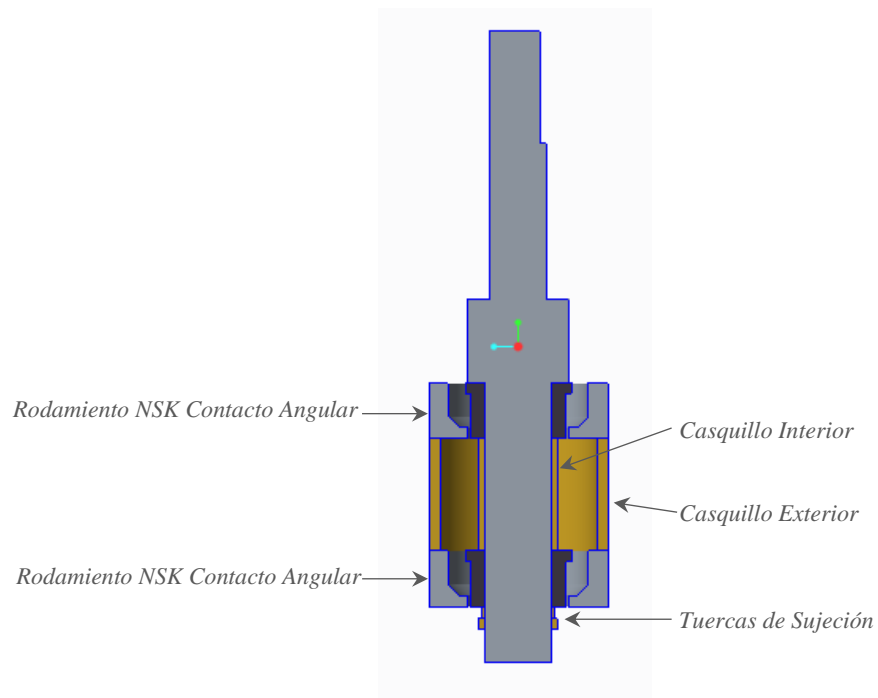


Figura 21. Vista en Sección Montaje Eje 1

SECCIÓN 6. TRANSMISIONES Y SENSORES. DISEÑO FINAL

El objetivo de esta sección es mostrar el diseño final del Brazo Robótico, incorporando las variaciones finales en dimensiones de los brazos, la introducción de reductoras y sensores. Finalmente, se presentará el diseño final del Brazo Robótico.

6.1 REDUCTORAS

Como se ha indicado en secciones anteriores, es necesario incorporar una reductora en el eje 2, para poder cumplir con los requerimientos de Par máximo. Asimismo, también se incorporará otra transmisión en el eje 1, con el objetivo de no transmitir los esfuerzos axiales (peso de la estructura) al motor, sino a los rodamientos de contacto angular seleccionados previamente. A continuación, se indican los sistemas de transmisión escogidos para cada eje, así como las características de los mismos (Transmisiones Zaragoza S.L., 2016).

Transmisión por correa dentada en Eje 1

Para el Eje 1, se ha escogido una transmisión por **Correa dentada y poleas**. Debido a la gran distancia entre dicho eje y el eje del motor, una transmisión por engranajes implicaría un diámetro demasiado grande tanto en el piñón como en la rueda (la relación de transmisión debe ser 1:1). Una transmisión por correa es más indicada cuando las distancias entre ejes son mayores.

Para la elección del diámetro, se tiene como restricción el diámetro del eje del motor 1 (12 mm), así como la mínima distancia entre ejes para que no se produzcan interferencias entre el Brazo 1 y el eje del Motor 1. En la *Figura 22* y en la *Tabla 13* se indican las características de dicha transmisión, así como una representación 3D de la misma.

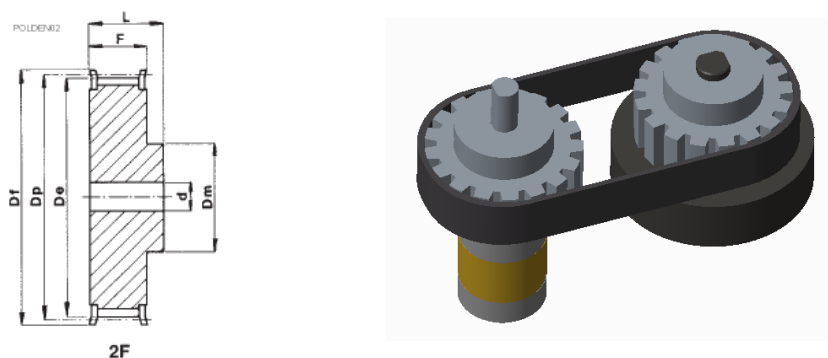


Figura 22. Transmisión por correa Eje 1

Referencia	Dp	Z	Df	Dm	d	L	F
17L050	51,54	17	57	36	10	32	19

Medidas en mm

Tabla 13. Transmisión por correa. Parámetros

Transmisión por engranaje en Eje 2

En el caso del Eje 2, se ha escogido una transmisión por **ruedas dentadas**, ya que la distancia entre sus ejes es relativamente pequeña. Las restricciones para escoger esta transmisión son la relación de transmisión 1:2, así como el diámetro del eje del Motor 2. En función de los diámetros primitivos escogidos, se modificará el alojamiento del Motor 2 para ajustarlo a dicha transmisión. En la *Figura 23* y en la *Tabla 14* se indican las características de la transmisión, así como una representación 3D de la misma.

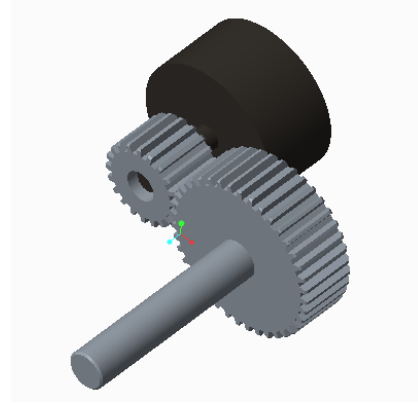
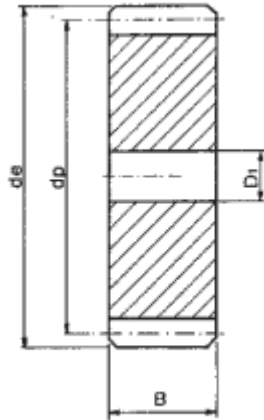


Figura 23. Transmisión por engranaje Eje 2

Referencia	M	Dp	Z	De	Di	B
Piñón	1	20	20	22	8	15
Rueda	1	40	40	42	10	15

Medidas en mm

Tabla 14. Transmisión por Engranaje. Parámetros

6.2 SENSORES FINAL DE CARRERA

Debido a la elección de motores paso a paso para las articulaciones 1, 2 y 3, es necesario la introducción de sensores de final de carrera. Mientras que los motores Servo incorporan un bucle cerrado en su sistema constructivo, que les permite conocer su posición en todo momento, los motores Paso a Paso carecen de él. Por tanto, para realizar un correcto control de los mismos, será necesario inicializar a una posición conocida los tres motores, antes de realizar ningún movimiento. Los sensores de final de carrera cumplen dicha función, permitiendo fijar un origen de giro en el momento de su activación.

Existen gran variedad de sensores de final de carrera, tanto basados en propiedades eléctricas (inductivos, capacitivos o resistivos) como en ópticas (fotosensores), o mecánicas (microrruptores) (Ollero Baturone, 2001). Por su simplicidad de montaje y control, se han escogido microrruptores para los tres motores.

El sensor microrruptor es básicamente un interruptor, cambia de estado cuando se ve actuado. Incorpora una pequeña palanca para facilitar la pulsación de dicho botón. En la *Figura 24* se muestra el microrruptor escogido, en este caso un *Microrruptor de Palanca 35 mm. 16A* (Diotronic, 2016).



Figura 24. Sensor Mocrruptor Palanca Diotronic

A continuación, se explica la colocación de dichos sensores, atendiendo a criterios tanto funcionales como constructivos.

Colocación en Eje 1

En este caso, la patilla de pulsación del microruptor se coloca paralela al eje de movimiento, a cierta distancia. Se añade una lámina de aluminio al sólido 1, con el fin de pulsar el microruptor cuando se llegue al final de carrera. En la *Figura 25* se muestra la colocación del sensor.

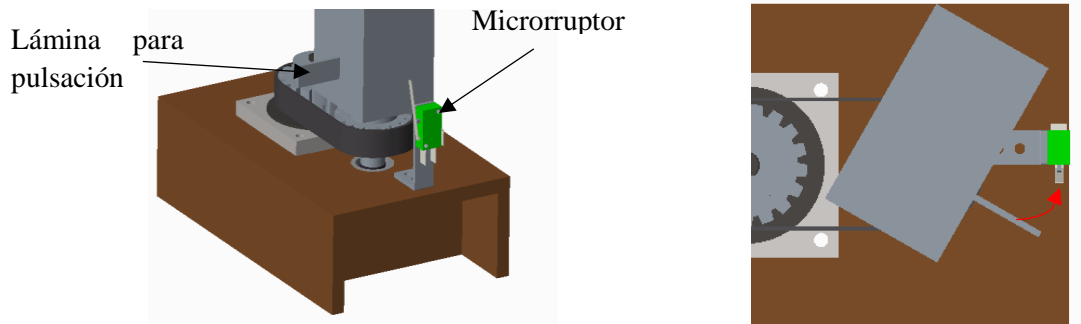


Figura 25. Final de Carrera Eje 1

Colocación en Eje 2 y Eje 3

Tanto en el eje 2 como en el eje 3, la patilla de pulsación del sensor se coloca perpendicular al eje de giro. Esta colocación permite el accionamiento del sensor con el propio brazo, pero se ha optado por añadir sendos bulones, que actuarán los microruptores. La ventaja de este sistema es que se evita la rotura de los componentes en caso de fallo del sensor, pues la patilla de pulsación del microruptor es flexible y soporta cierta presión. En la *Figura 26* y la *Figura 27* se muestra la colocación de los sensores.

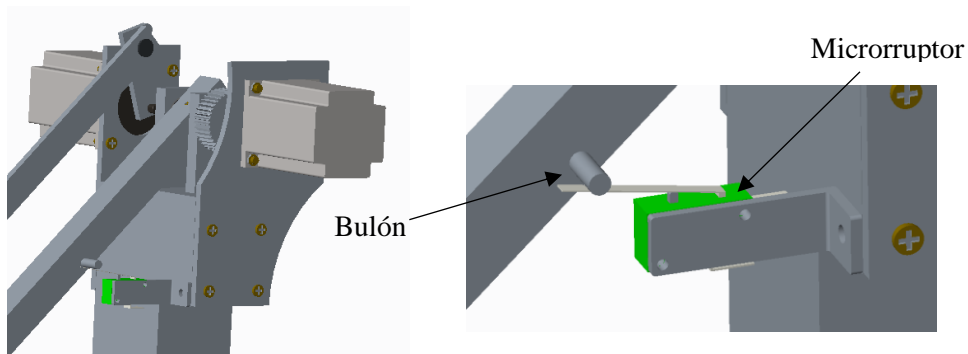


Figura 26. Final de Carrera Eje 2

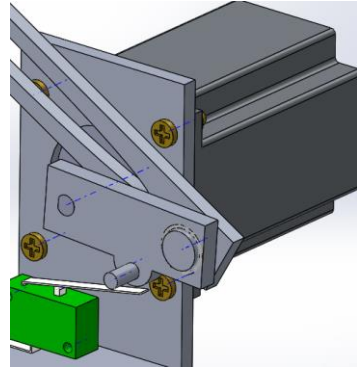
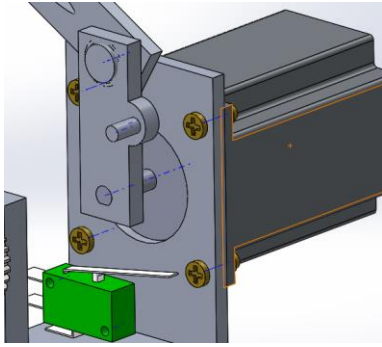


Figura 27. Final de Carrera Eje 3

6.3 DISEÑO FINAL

Realizadas las modificaciones necesarias, se presentan a continuación algunas imágenes de los ensamblajes más significativos del Brazo Robótico, diseñado en SolidWorks. Además, en el *Anexo 6* se añaden los planos de conjunto y de pieza, de todos los componentes del mismo.

En la *Figura 28* se muestra una vista completa del Brazo Robótico. Este modelo consta de 8 sólidos, unidos entre ellos mediante articulaciones angulares. Está formado por 48 piezas (sin contar la tornillería), de las cuales 5 son motores, 3 son sensores y 8 son rodamientos. Contiene además dos transmisiones (una mediante engranajes y otra por correa dentada) y 5 ejes. El resto de las piezas conforman la estructura general del brazo.

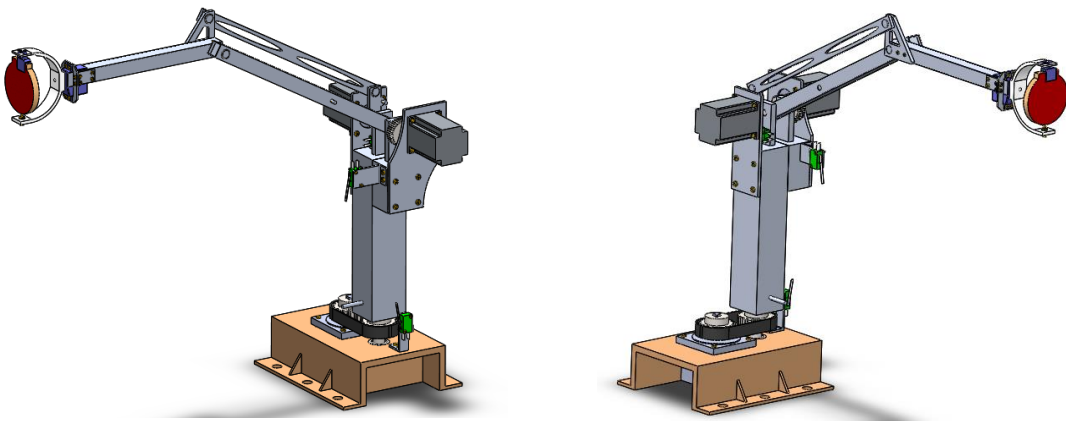


Figura 28. Modelo del Brazo Robótico en Solidworks

Se muestran a continuación los sólidos que componen la estructura. En primer lugar, el denominado como Sólido 0 o Bancada, se compone de una estructura de acero que aloja por una parte el Motor 1, y por otro lado el Eje 1. Como ya se ha comentado anteriormente, se ha escogido un motor NEMA 34066. Está también incorporado el Sensor de Final de Carrera del Motor 1. En la *Figura 29* se muestra dicho ensamblaje y su vista explosionada.

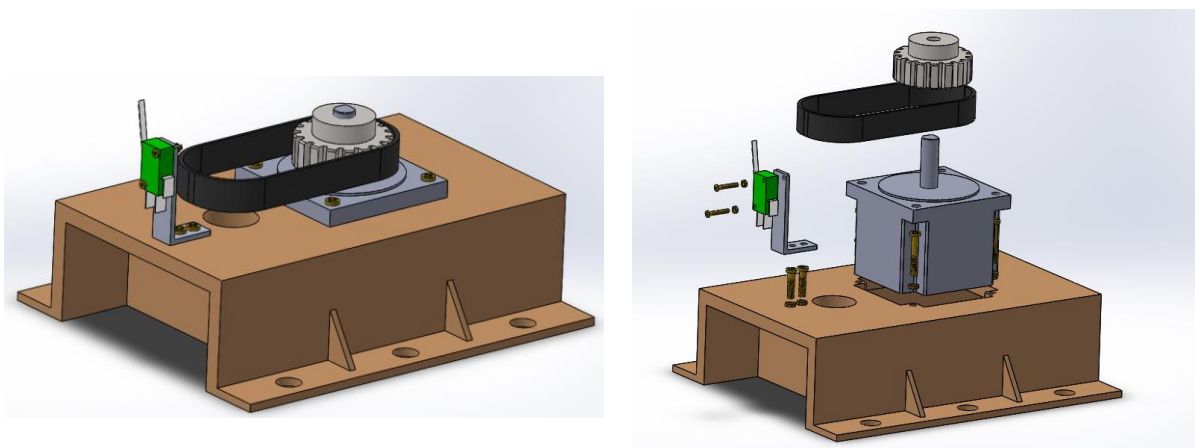


Figura 29. Ensamblaje Sólido 0 (Bancada)

A continuación, en la *Figura 30*, se muestra el Sólido 1 o Base, sobre el que se realiza el primer giro en dirección vertical. Está formado por una estructura de aluminio hueca, el Eje 1 con sus rodamientos y casquillos, dos soportes para los Motores 2 y 3, los propios Motores 2 y 3 (ambos NEMA 23079), dos alojamientos para los rodamientos del Eje 2 con sus rodamientos de bolas y los sensores de final de carrera de los Motores 2 y 3.

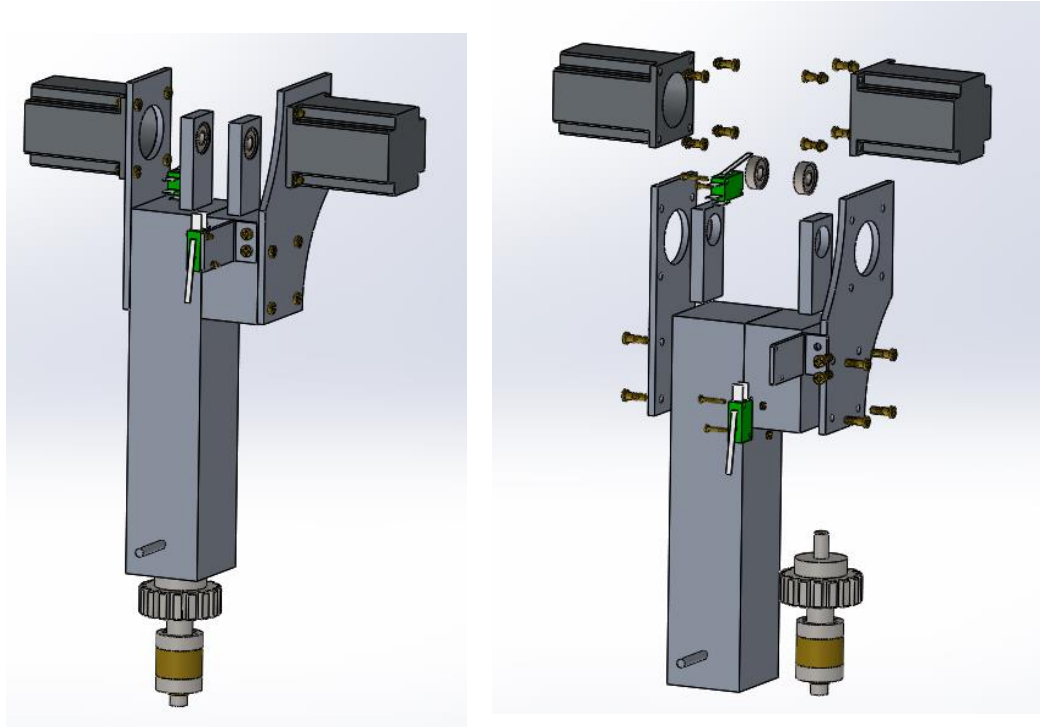


Figura 30. Ensamblaje Sólido 1 (Base)

El siguiente sólido presente en el mecanismo es el Sólido 2 o Brazo 2. Se compone de un perfil cuadrado hueco de aluminio para la estructura, además de la transmisión reductora en el Eje 2. También incorpora los Ejes 2 y 3, así como los rodamientos de bolas del Eje 3. En la *Figura 31* se muestra dicho sólido.

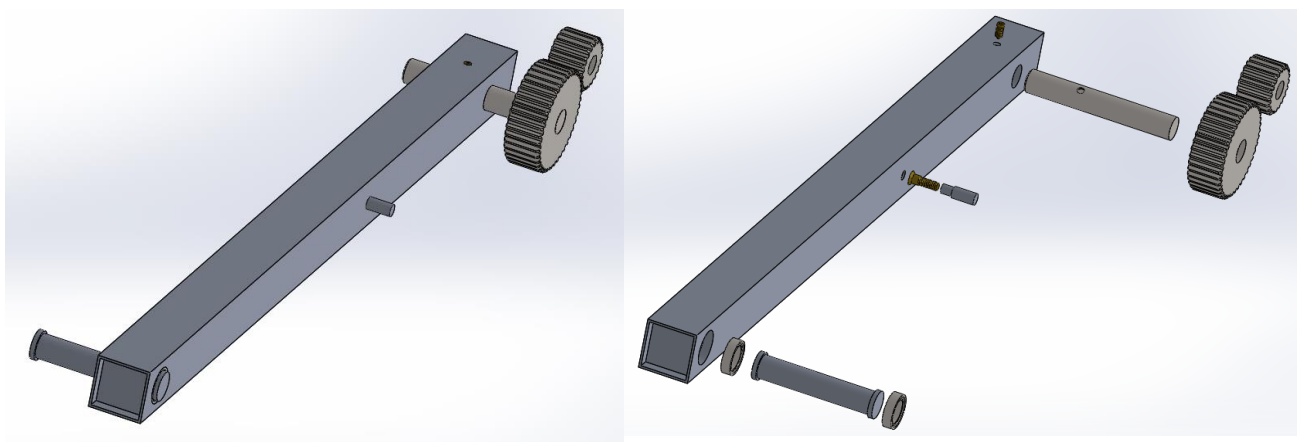


Figura 31. Ensamblaje Sólido 2 (Brazo 2)

Siguiendo la cadena cinemática, se encuentra el Sólido 3 o Brazo 3. Se compone de un perfil cuadrado hueco de aluminio, una chapa triangular para el Tirante 2, el eje correspondiente a la unión entre los Tirantes 2 y 3, el Motor 4 (Futaba 3003) y su soporte. Incorpora además el rodamiento de bolas que une ambos tirantes. En la *Figura 32* se observan todos los componentes.

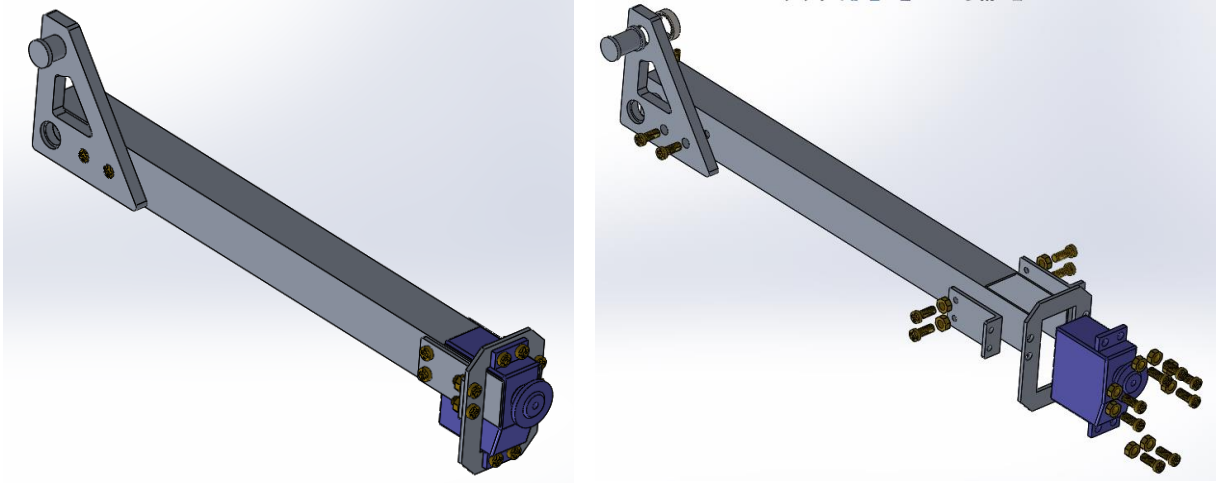


Figura 32. Ensamblaje Sólido 3 (Brazo 3)

Por último, en la *Figura 33* se presenta el elemento terminal, compuesto por los sólidos 4 y 5. Este elemento se compone de una muñeca de PVC como soporte, el Motor 5 (Futaba 3111), la Pala de contrachapado y la sujeción por punto mediante un tornillo.

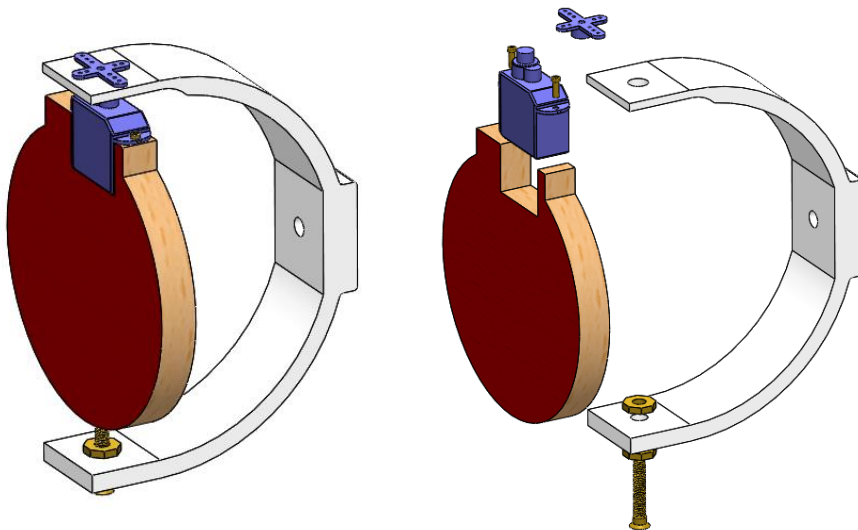


Figura 33. Ensamblaje Sólidos 4 y 5 (Muñeca y Pala)

SECCIÓN 7. DETERMINACIÓN DEL ESPACIO DE TRABAJO FINAL

El objetivo de esta sección es determinar el Volumen alcanzable por el Brazo Robótico, y definir en consecuencia un espacio de trabajo contenido en dicho volumen. Para ello, se tendrán en cuenta las dimensiones y restricciones indicadas en la *Figura 34*.

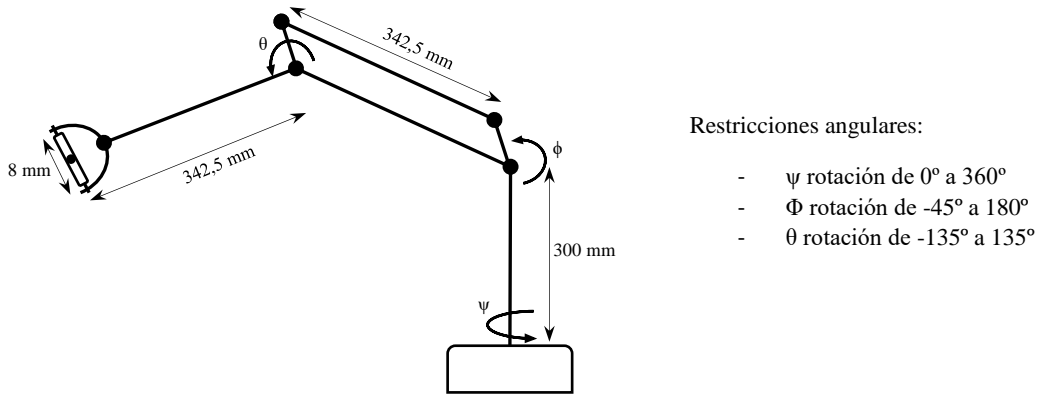


Figura 34. Distancias principales y restricciones angulares del Brazo Robótico

7.1 VOLUMEN TOTAL ALCANZABLE

Se calcula a continuación el volumen alcanzable por el Brazo Robótico (Bajd, Mihelj, Lenarcic, Stanovnic, & Munih, 2010), delimitado tanto por el alcance de los brazos y las restricciones angulares, como por la línea horizontal de la mesa de juego. Se supondrá el Brazo Robótico colocado en el centro de la mesa, a una distancia horizontal “a”, con la bancada a la altura de la mesa de juego. El Volumen de trabajo obtenido es la revolución del área indicada en la *Figura 35*, alrededor del primer eje de giro.

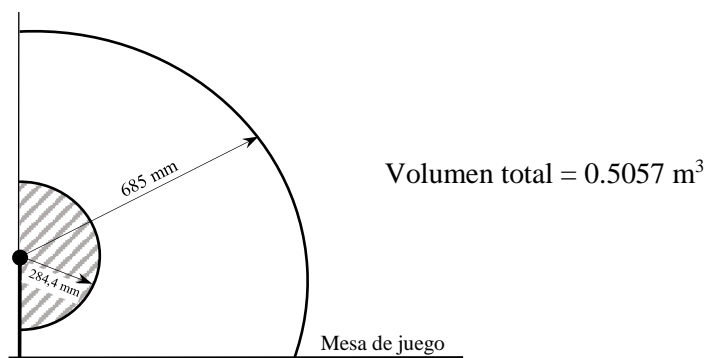


Figura 35. Volumen Alcanzable

7.2 ESPACIO DE TRABAJO

Una vez determinado el volumen alcanzable, se define el Espacio de Trabajo del Brazo Robótico. La geometría escogida es un paralelepípedo, de tal manera que esté contenido en el volumen anteriormente calculado.

En primer lugar, se calculan las dimensiones de la base, para maximizar el área en planta. Posteriormente, se calcula la altura como la intersección de la línea vertical con la Esfera Exterior del volumen alcanzable. En la *Figura 36* se indican las dimensiones y relaciones entre ambos volúmenes.

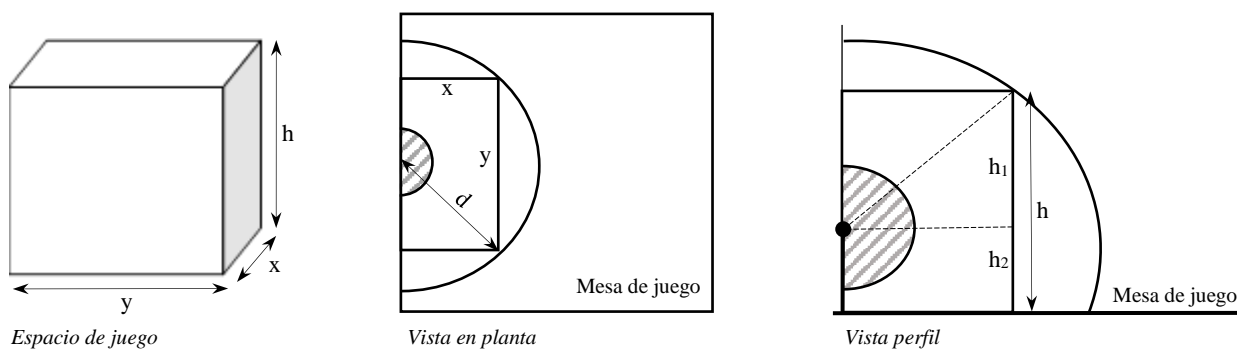


Figura 36. Definición del Espacio de Trabajo

Tras realizar los cálculos indicados en el *Anexo 1*, el Espacio de Trabajo final es de **0,31 m³**, indicado en la *Figura 37*.

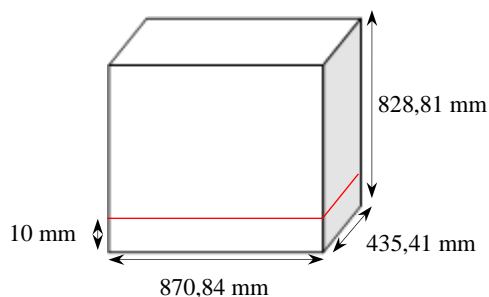


Figura 37. Espacio de Trabajo Final

Se restringe el Espacio comprendido entre la Mesa de Juego y 10 mm por encima, para evitar el choque de la pala con la mesa.

SECCIÓN 8. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO DEL MECANISMO

El objetivo de esta sección es realizar un análisis teórico del Brazo Robótico propuesto, tanto cinemático como dinámico. Los resultados de Pares Motores obtenidos se compararán con los resultantes de la simulación con *Pro-Engineer*, para determinar la similitud de ambos métodos.

8.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO

Bases de Proyección

Se realiza un análisis como Sólido Rígido del Brazo Robótico, siguiendo la metodología expuesta a continuación (Lladó Paris & Sanchez Tabuenca, 2013). En primer lugar, se define una estructura simplificada, con bases de proyección en cada sólido. Se escogerá como base de proyección global la correspondiente al Sólido 1 (123^a). En la *Figura 38* y la *Figura 39* se indican las bases de proyección de cada sólido. A continuación, se desarrollan las condiciones de enlace, y ecuaciones de velocidad y aceleración de cada punto. Todas ellas están reflejadas en el *Anexo 4*.

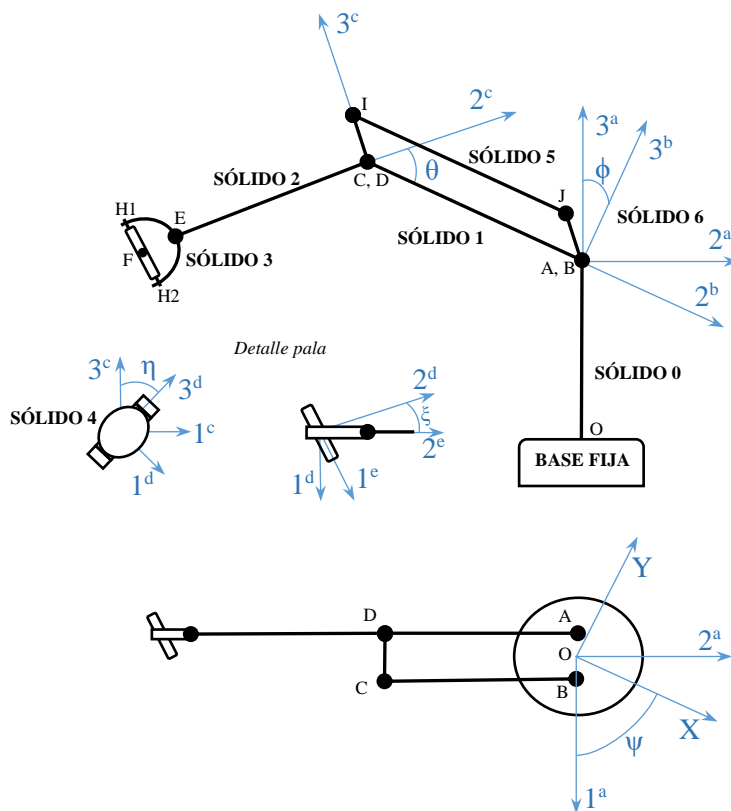


Figura 38. Esquema simplificado del Brazo Robótico

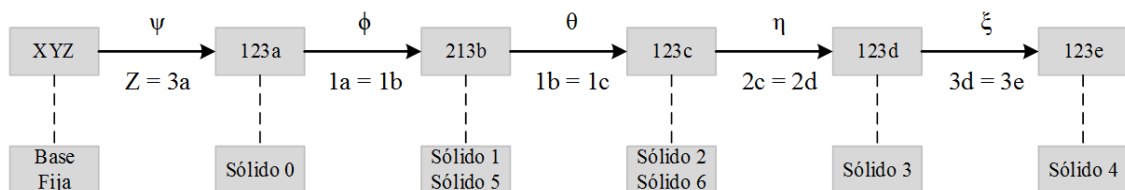


Figura 39. Esquema de Cambio de Bases

8.2 ANÁLISIS DINÁMICO

Se realiza un análisis Dinámico de Fuerzas y Momentos al Brazo Robótico a partir de las Ecuaciones de Newton, aplicando equilibrio de fuerzas y momentos a cada Sólido (Bajd, Mihelj, Lenarcic, Stanovnic, & Munih, 2010). Todas las ecuaciones se añaden en el *Anexo 4*.

La secuencia de resolución del problema será la siguiente. En primer lugar, se resolverá el conjunto Muñeca-Pala, calculando las acciones y momentos en los tres ejes de proyección. Posteriormente se resolverá el conjunto formado por los sólidos 1, 2, 5 y 6, calculando únicamente las acciones y momentos en el plano de movimiento de dicho conjunto. Finalmente se resolverá el sólido 0, calculando el momento en el eje de movimiento. En la *Figura 40* se esquematiza el orden seguido.

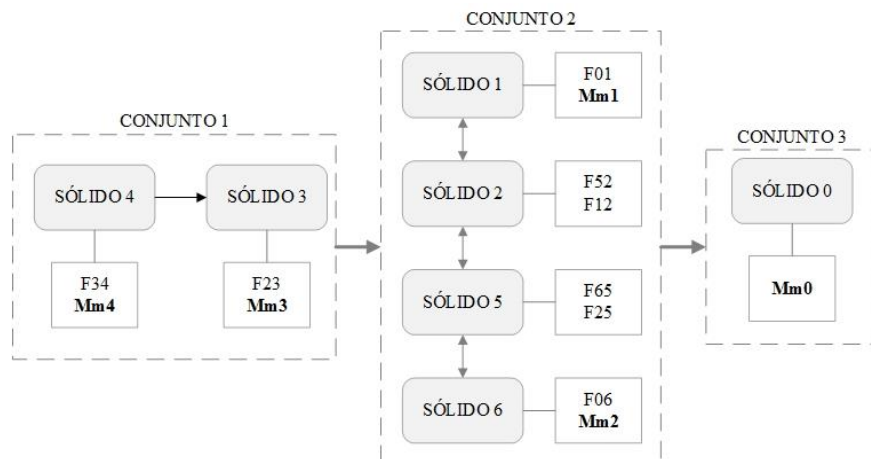


Figura 40. Análisis Dinámico. Esquema de resolución

8.3 RESOLUCIÓN Y OBTENCIÓN DE PARES MOTORES

Tras presentar las diferentes fuerzas y momentos que intervienen en las Ecuaciones de Newton, se procede a la resolución de las mismas, mediante la ayuda del programa de cálculo Matlab. En el *Anexo 4* se detalla el programa realizado, así como los pasos seguidos hasta la obtención de los resultados finales.

En esencia, se ha optado por la resolución en simbólico, obteniendo las expresiones de todas las fuerzas y momentos en función de los parámetros angulares, de velocidad y aceleración angular del mecanismo. Tras obtener dichas expresiones, se han introducido los datos específicos del Brazo Robótico, así como los mismos perfiles de posición, velocidad y aceleración usados en las simulaciones con *Pro-Engineer*. Esto permite realizar una comparación con cierto grado de precisión entre los valores de los Pares Motores obtenidos mediante los cálculos teóricos y los que aporta la simulación en *Pro-Engineer*.

En el *Gráfico 3* y *Tabla 15* se presentan los resultados para los pares motores de todos los ejes obtenidos analíticamente.

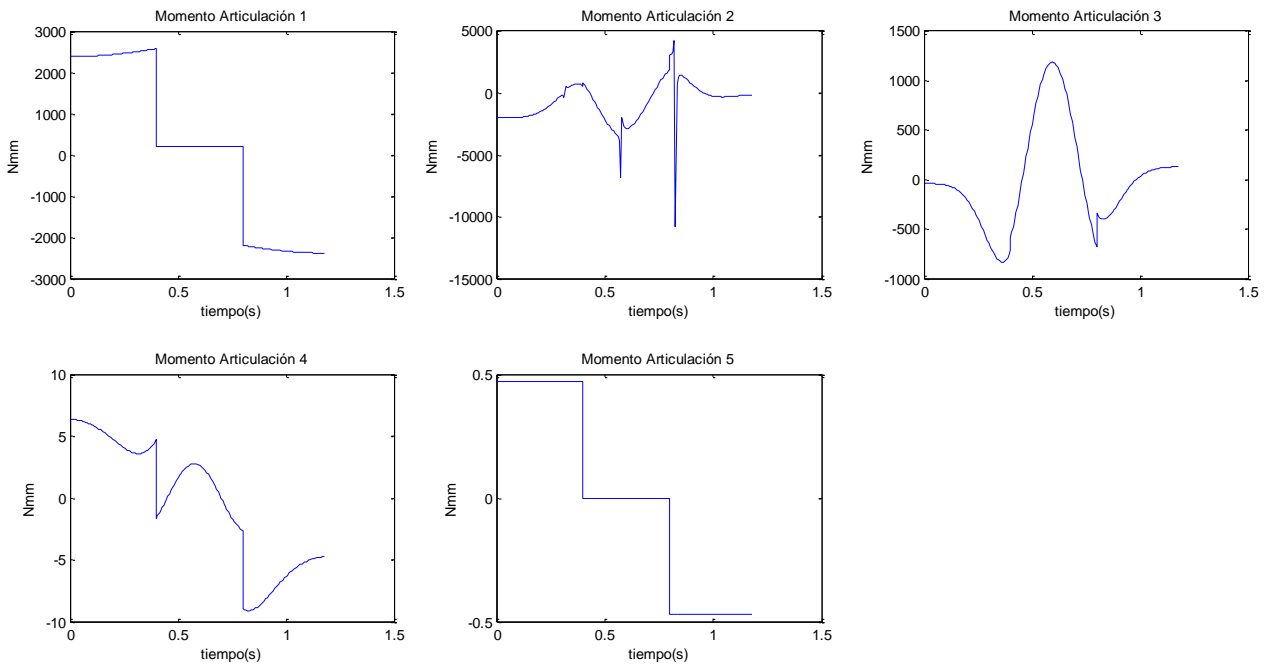


Gráfico 3. Gráficas de Par Motor con respecto al tiempo

Eje de Giro	Par Máximo	Par Máximo Pro-Engineer	Error Absoluto	% Error Relativo
Eje 1	2579 Nmm	2910 Nmm	331 Nmm	11.3 %
Eje 2	2000 Nmm	2254 Nmm	254 Nmm	11.2 %
Eje 3	1159 Nmm	1128 Nmm	31 Nmm	2.75 %
Eje 4	9.1 Nmm	10 Nmm	0.9 Nmm	9 %
Eje 5	0.47 Nmm	0.5 Nmm	0.03 Nmm	6 %

Tabla 15. Comparación de Resultados

Como se puede apreciar, los resultados son similares entre los dos métodos de cálculo, del mismo orden de magnitud en ambos métodos. Se puede observar un error algo elevado en los ejes 1 y 2. Esto puede deberse a la acumulación de errores de aproximación conforme se resuelve analíticamente el modelo (El par motor en el eje 1 y 2 son los últimos en resolverse). El resto de ejes se encuentran por debajo del 10% de error.

SECCIÓN 9. ESTUDIO DE RESISTENCIA

En esta sección se realizará un estudio de carga estático y dinámico para las piezas más comprometidas del mecanismo. Se verificará que todas están sometidas a tensiones menores que su límite de fluencia, y se optimizará el diseño para conseguir un Coeficiente de Seguridad adecuado.

Las fuerzas de enlace que intervienen en cada sólido, así como el peso se obtienen de las simulaciones realizadas con *Pro-Engineer*. Por otro lado, para las fuerzas de inercia, se han tomado las aceleraciones de los centros de gravedad, obtenidas mediante el Estudio por Newton, en la *Sección 8*, y aplicando la siguiente fórmula:

$$\bar{F}i_j = -m_j \cdot \bar{a}_{Gj}, \quad \forall \text{ sólido } j$$

Sin embargo, debido a la gran variabilidad de las fuerzas de enlace con respecto al movimiento del Brazo, y la imposibilidad de incluir las fuerzas de inercia (volumétricas) en el programa *SolidWorks*, se han obviado para el presente estudio. Sí que se han calculado unos valores aproximados para cada componente, que se indican en las siguientes páginas (*Tabla 16*, *Tabla 17* y *Tabla 20*).

9.1 BRAZO 3

La primera pieza analizada es el Brazo 3 (perfil cuadrado hueco de aluminio de 22 mm de lado y 2 mm de espesor). Se ha realizado un estudio estático incorporando el peso del sólido 3 y 4 (muñeca y pala) en el extremo del brazo, así como su peso propio.

Fuerzas de Enlace	Valor (N)	Fuerzas de Inercia	Valor (N)
F_{43x}	22.1	F _{ix}	2.6303
F_{43y}	0	F _{iy}	23.4901
F_{43z}	3	F _{iz}	1.2473

Tabla 16. Fuerzas de Enlace e Inercia. Brazo 3

Los resultados obtenidos muestran un desplazamiento máximo de **0,014 mm** en el extremo más alejado al apoyo, y una tensión máxima de **1,561 MPa**. Se observa por tanto que el punto con mayor sollicitación de la barra tiene un Coeficiente de Seguridad de **16,5** (tomando como referencia el límite elástico del material, 27,57 MPa). En la *Figura 41* se muestran los desplazamientos y tensiones distribuidas en la barra.

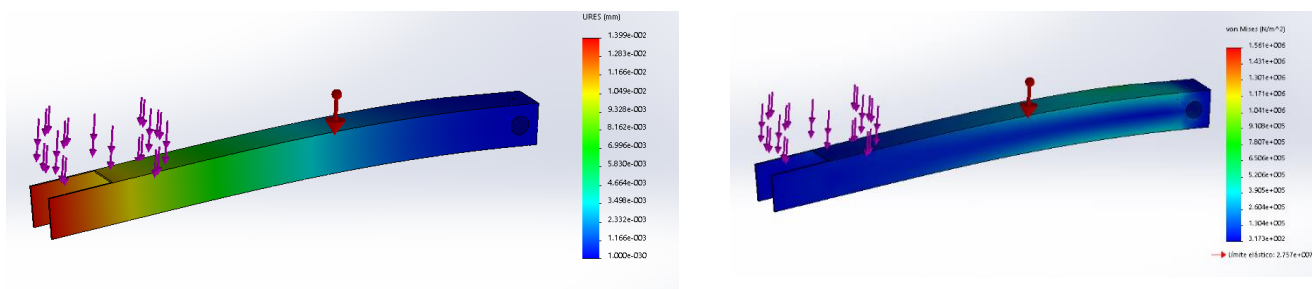


Figura 41 . Distribución de desplazamientos y tensiones en el Brazo 3

9.2 BRAZO 2

Al igual que en el caso anterior, se realiza un análisis estático al Brazo 2 (mismo perfil), incorporando el peso de los sólidos 2, 3 y 4 (Brazo 3, Muñeca y Pala). También se incorpora el peso propio del brazo. Se incluyen las fuerzas de enlace entre el Brazo 2 y el Brazo 3.

Fuerzas de Enlace	Valor (N)	Fuerzas de Inercia	Valor (N)
F_{32x}	25	F_{ix}	3.1516
F_{32y}	20	F_{iy}	7.1627
F_{32z}	0	F_{iz}	1.7627

Tabla 17. Fuerzas de Enlace e Inercia. Brazo 2

En este caso, se obtiene un desplazamiento máximo de **0,096 mm** en el extremo contrario al empotramiento, y una tensión máxima de **1,765 MPa** en la zona del empotramiento. En este caso, el Coeficiente de Seguridad es de **14,5**. En la *Figura 42* se indican los diagramas de desplazamiento y tensiones distribuidas.

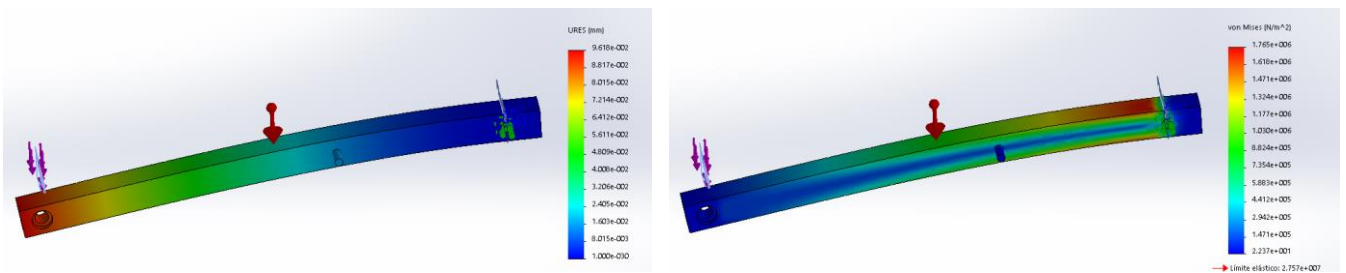


Figura 42. Distribución de desplazamientos y tensiones en el Brazo 2

9.3 TIRANTE 3

El siguiente elemento a analizar es el Tirante 3 (pieza unida al Brazo 3, encargada de transmitir el giro propiciado por el Motor 3). Se propone un diseño inicial en forma de triángulo rectángulo, con un espesor de 6 mm, que permita alojar el rodamiento necesario y los tornillos de sujeción con el brazo. Se realiza un estudio de Tensiones y Desplazamientos, imponiendo como sollicitación la fuerza correspondiente al par motor aplicado por el Motor 3.

Los resultados obtenidos muestran una sollicitación menor en la zona central de la pieza. Por ello, se realiza un segundo diseño con un vaciado en la parte central, siendo éste más ligero y elegante. Tras realizar el mismo estudio estático, se obtiene un desplazamiento máximo de **0,0026 mm** en el punto de aplicación de la fuerza, y una tensión máxima de **3,78 MPa** en varias zonas de la pieza. Por tanto, el Coeficiente de Seguridad mínimo de la pieza es de **7,29**. En la *Figura 43* se observan los dos diseños con sus distribuciones de desplazamientos y tensiones.

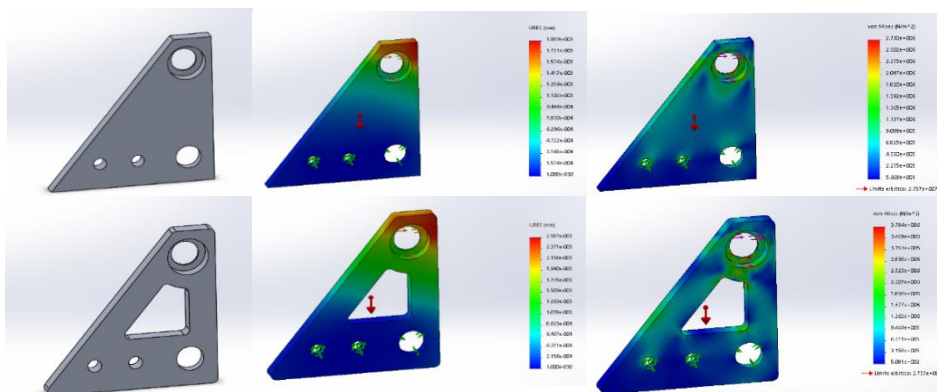


Figura 43. Distribución de desplazamientos y tensiones en el Tirante 3. Dos diseños

9.4 TIRANTE 1

A continuación, se analiza el Tirante 1 (encargado de transmitir la fuerza realizada por el Motor 3, al Tirante 2). Para ello, se proponen 4 diseños, basándose en criterios tanto resistentes como de ligereza y estéticos. La sollicitación para este componente es la fuerza correspondiente al par motor del Motor 3, en dirección longitudinal a la barra.

Los resultados obtenidos se indican en la *Tabla 18*, y los diagramas de desplazamientos y tensiones distribuidos se muestran en la *Figura 44*. Como se puede observar, se parte de una situación con una distribución de tensiones menor, y se realizan sucesivos vaciados controlando que las tensiones que aparecen no sean demasiado elevadas.

Diseño	Tensión Máxima	CS	Peso	Inercia
Perfil rectangular macizo	1,07 MPa	25,77	95,75 gr	1,01 gr/mm ²
Perfil vaciado elipses	1,226 MPa	22,49	66,8 gr	0,779 gr/mm ²
Perfil vaciado triángulos 1	1,669 MPa	16,52	77,36 gr	0,844 gr/mm ²
Perfil vaciado triángulos 2	1,5 MPa	18,38	75,31 gr	0,847 gr/mm ²

Tabla 18. Resultados del Estudio de Tensiones para diferentes perfiles en el Sólido 7

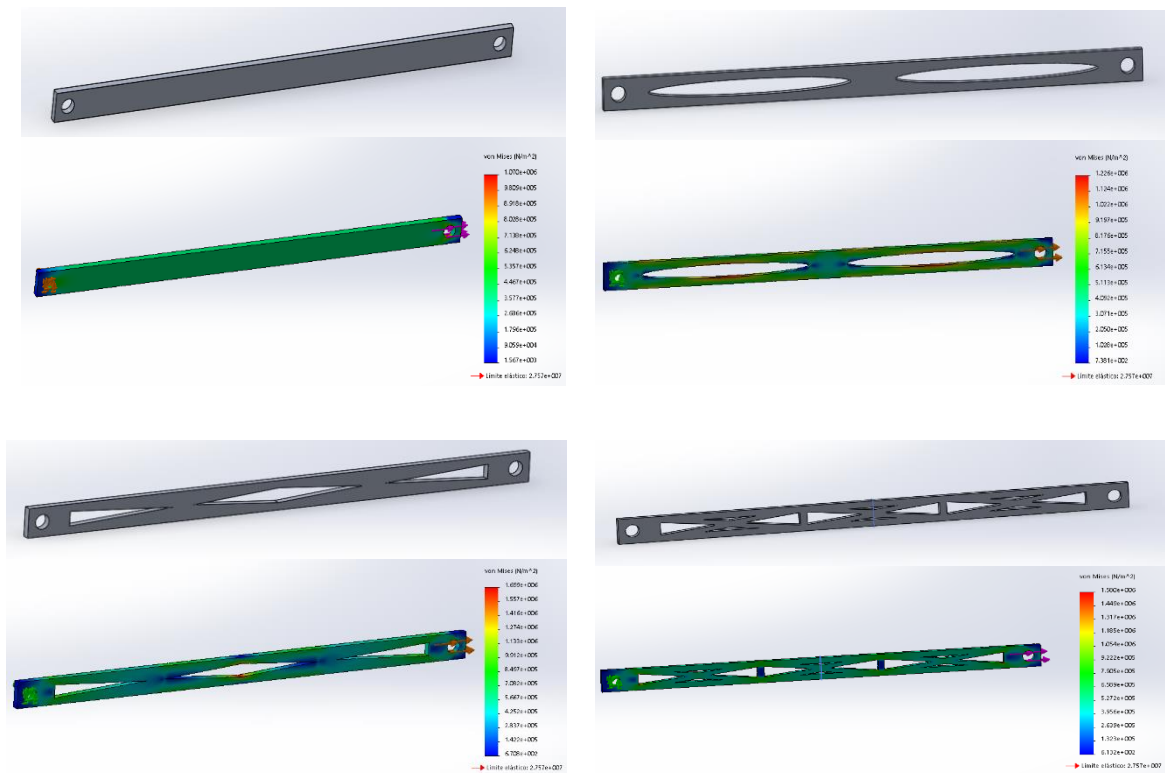


Figura 44. Distribución de tensiones en el Tirante 1. Varios diseños

Tras considerar las cuatro posibilidades, se escoge la segunda opción, con el vaciado en elipses, debido a su bajo peso e inercia, y a su sencillez constructiva. Además, el perfil de tensiones de la pieza es adecuado a su funcionamiento.

9.5 ASIENTO MOTORES 2 Y 3

Los siguientes componentes a analizar son las piezas que sirven de sujeción para los Motores 2 y 3 (perfiles de aluminio de 5 mm de espesor). Se realiza un análisis estático considerando el peso de los motores, así como el momento que ejercen en los Alojamiento por estar su centro de masas descentrado con respecto al plano vertical. Estos datos implican que ambos sólidos están soportando una fuerza vertical de 9.8 N (distribuida entre las cuatro sujeciones) a una distancia de 39,37 mm de los agujeros de sujeción en dirección paralela a los ejes de los mismos. Esta carga excéntrica crea un momento de 385,83 Nmm que hará flexionar ambos asientos. Además, se ha incluido el momento de reacción debido al par ejercido por cada uno de los motores.

Los resultados obtenidos con los estudios, indicados en la *Tabla 19*, muestran el correcto dimensionamiento de las piezas, pues los desplazamientos son mínimos y las tensiones muy inferiores a la máxima.

Pieza	Tensión Máxima	CS	Desplazamiento Máximo
Asiento Motor 2	3,56 MPa	7,7	0,046 mm
Asiento Motor 3	4,95 MPa	5,5	0,062 mm

Tabla 19. Resultados del Estudio de Desplazamientos y Tensiones para los Asientos del Motor 2 y Motor 3

En la *Figura 45* y la *Figura 46* se pueden observar las distribuciones de desplazamientos y tensiones en ambos ejes.

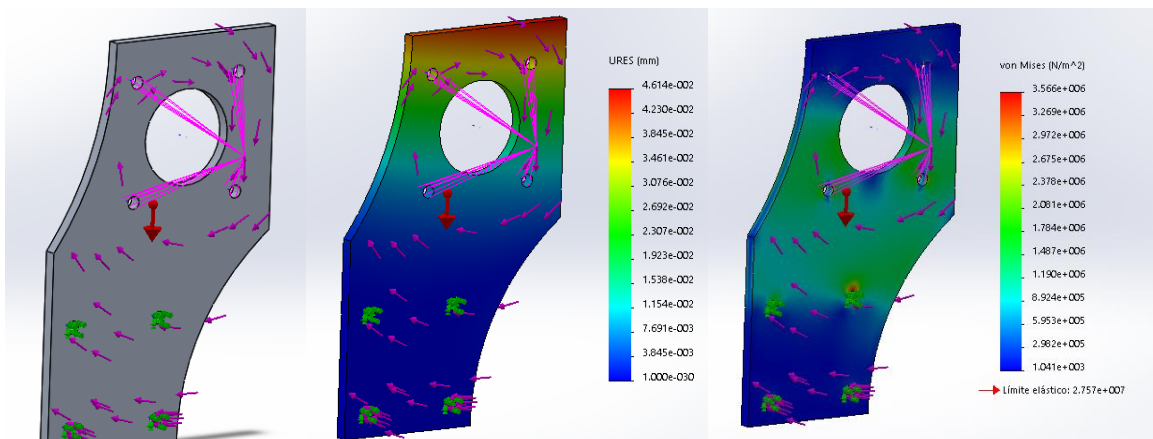


Figura 45. Distribución de desplazamientos y tensiones. Alojamiento Motor 2

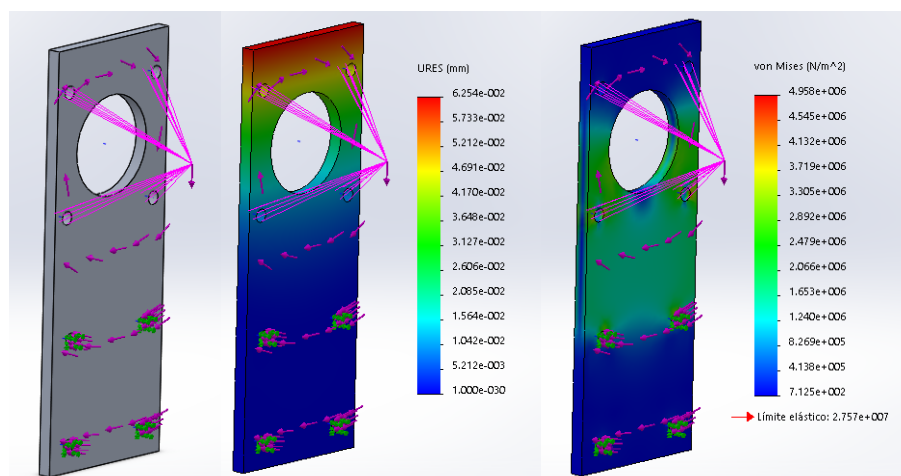


Figura 46. Distribución de desplazamientos y tensiones. Alojamiento Motor 3

9.6 BASE

Es necesario también comprobar el correcto dimensionamiento del Sólido 1, la Base, sobre la que se sustentan los Motores 2 y 3, además del Brazo 2. Al igual que con las piezas anteriores, se realiza un estudio estático, teniendo en cuenta el peso de las piezas anteriormente mencionadas. Por una parte, se introduce el peso de los Motores, registrados a partir de los Asientos en los laterales de la base (1 kg cada motor). Por otro lado, el peso de la estructura de los dos brazos se introduce como una fuerza en la parte superior de la Base (806,75 gr en total). Finalmente se considera también el Peso Propio de la Base.

Fuerzas de Inercia	Valor (N)
F_{ix}	11.85
F_{iy}	7.40
F_{iz}	0

Tabla 20. Fuerzas de Inercia. Base

En la *Figura 47* se indican los resultados obtenidos, siendo el desplazamiento máximo de **0,0032 mm** y la tensión máxima de **6,529 MPa**. El Coeficiente de Seguridad menor de la pieza es de **4,22**. Todos estos resultados indican que la Base está correctamente dimensionada.

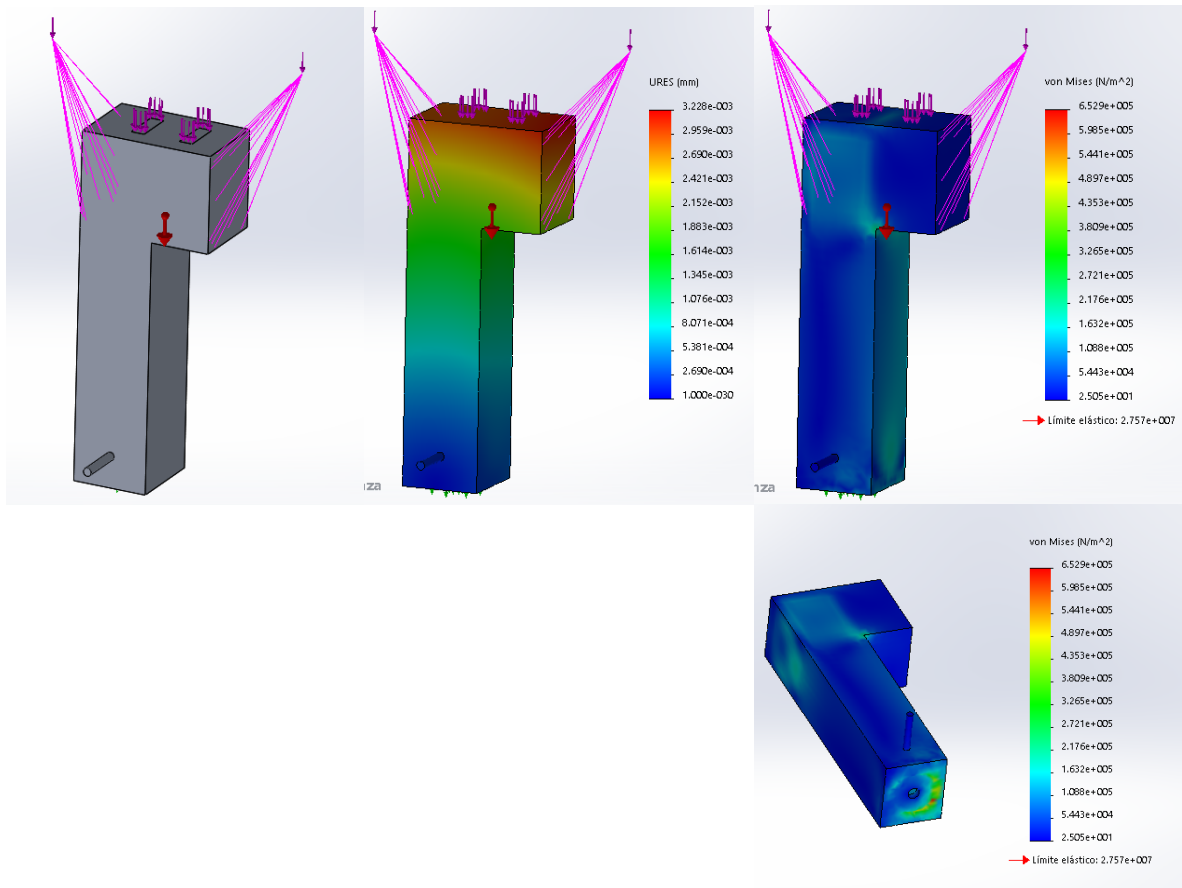


Figura 47. Distribución de desplazamientos y tensiones en la Base

9.7 BANCADA

Por último, se realiza un análisis estático a la Bancada, elemento que soporta todo el peso del conjunto mecánico. En este caso la sollicitación es una fuerza de **4,87 kg \rightarrow 47,7 N**, en dirección vertical y aplicada sobre el apoyo de los rodamientos de contacto angular. Además, se tiene en cuenta el peso del Motor 1 y el Peso Propio de la Bancada. Se ha añadido también el momento de reacción debido al par del Motor 1. Como se puede observar en la *Figura 48*, tanto los desplazamientos como las tensiones son pequeños (**0,004 mm** y **0,23 MPa**).

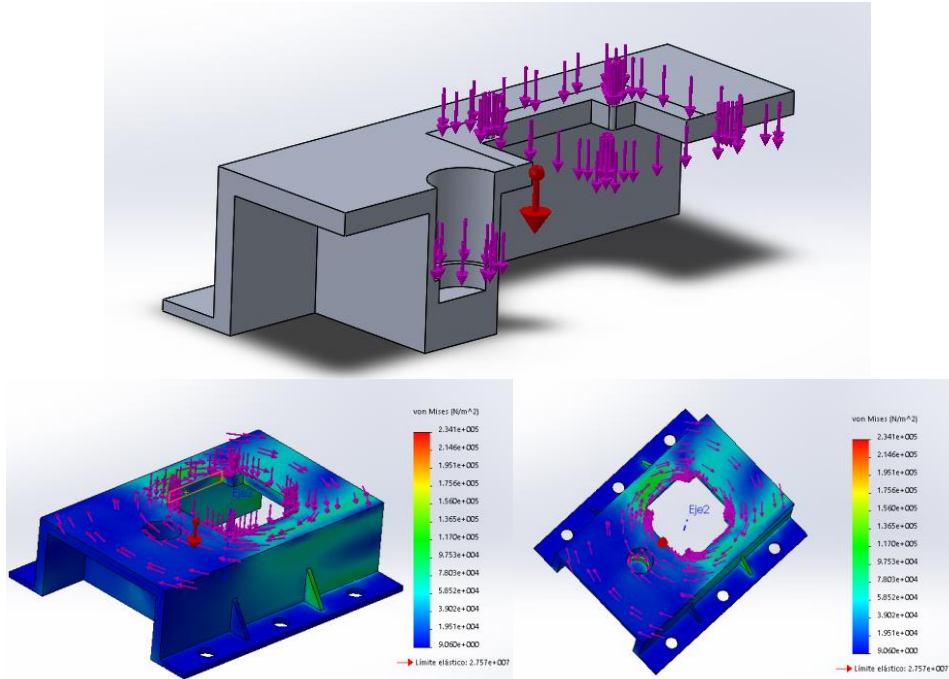


Figura 48. Distribución de desplazamientos y tensiones en la Bancada

SECCIÓN 10. ALGORITMO DE CONTROL

En esta sección se explica el algoritmo desarrollado para el movimiento de los motores que componen el Brazo Robótico, así como su implementación Hardware. Este programa permite posicionar, dependiendo de los datos de entrada, los 5 motores del Brazo Robótico de manera simultánea, en el tiempo indicado por el controlador. Para su desarrollo, se utiliza el Lenguaje Arduino (Arduino, 2016), ya que se va a implementar en un Arduino MEGA.

10.1 COMPONENTES ELECTRÓNICOS

En primer lugar, en la *Figura 49* se muestra el Circuito Integrado usado, así como su PINOUT.

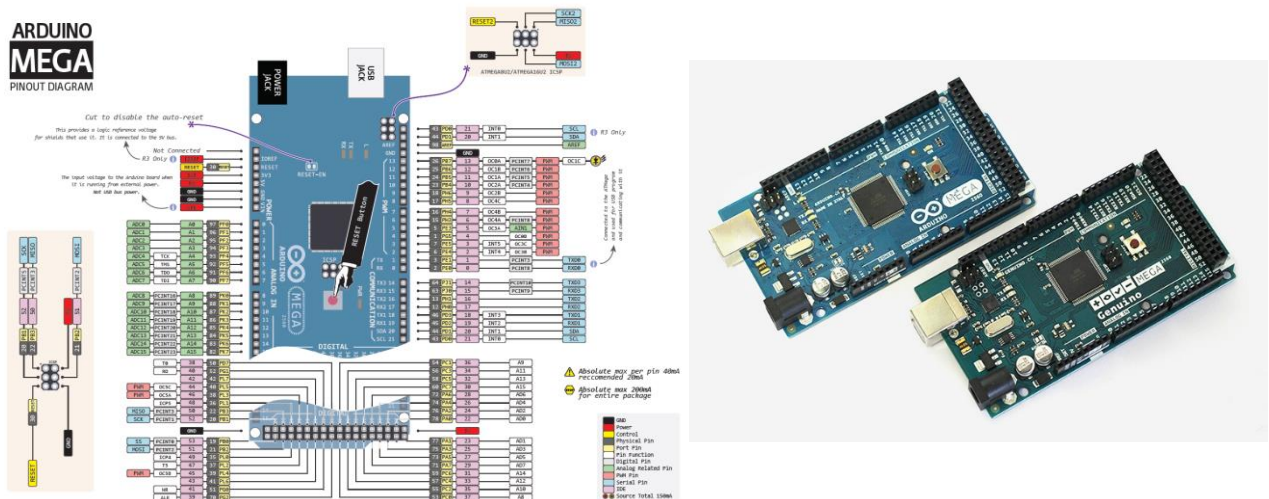
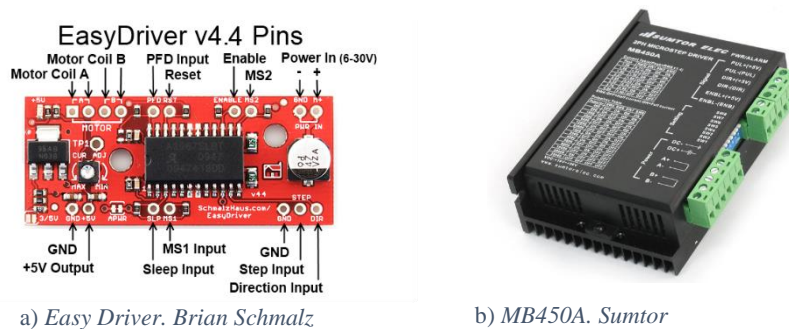


Figura 49. Arduino MEGA. Diagrama PINOUT y Circuito Integrado

Para el control de los Motores Paso a Paso, en adelante Stepper, se utiliza un Driver de Control del tipo *Easy Driver* o *MB450A* (para el caso de corriente de hasta 3 Amperios), como se muestra en la *Figura 50*. Ambos Drivers presentan las mismas conexiones, por lo que se seleccionará uno u otro en función de la Intensidad demandada por los motores.



a) Easy Driver. Brian Schmalz

b) MB450A. Sumtor

Figura 50. Drivers de Control

Además, como se ha indicado en la *Sección 6*, serán necesarios Sensores de Final de Carrera para el posicionamiento inicial de los Stepper.

Para el control de los Servos, se utilizará la librería *Servo.h*, desarrollada por la comunidad de usuarios de Arduino y de libre utilización.

10.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

Para desarrollar el Software de posicionamiento de los motores, es necesario tener en cuenta una serie de características impuestas por el diseño constructivo o por el Software encargado del cálculo de las posiciones finales. En primer lugar, las variables transmitidas al Arduino MEGA serán la posición final angular de cada uno de los motores, así como el tiempo en el que tienen que estar cada motor en dicha posición. Además, se recibirá una señal de inicio de movimiento, cada vez que los motores pasen de una posición de reposo a otra de movimiento. En cuanto a los motores, será necesario inicializar los Stepper a una posición conocida, pues no incorporan un bucle cerrado en su diseño interno. Se ha utilizado un algoritmo de control de aceleración para dichos motores (Atmel Corporation, 2016) explicado en el *Anexo 5*. Para los Servos, este paso no es necesario, ya que sí disponen de dicho sistema.

Partiendo de estas consideraciones, se realiza un diseño básico del Software que se indica en el siguiente esquema de bloques (*Figura 51*)

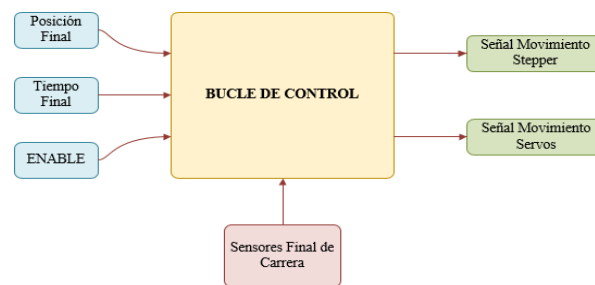


Figura 51. Esquema inicial de Control

Dentro del Bucle de Control se encuentran los bloques indicados en el siguiente diagrama (*Figura 52*), que se explican en el *Anexo 5*.

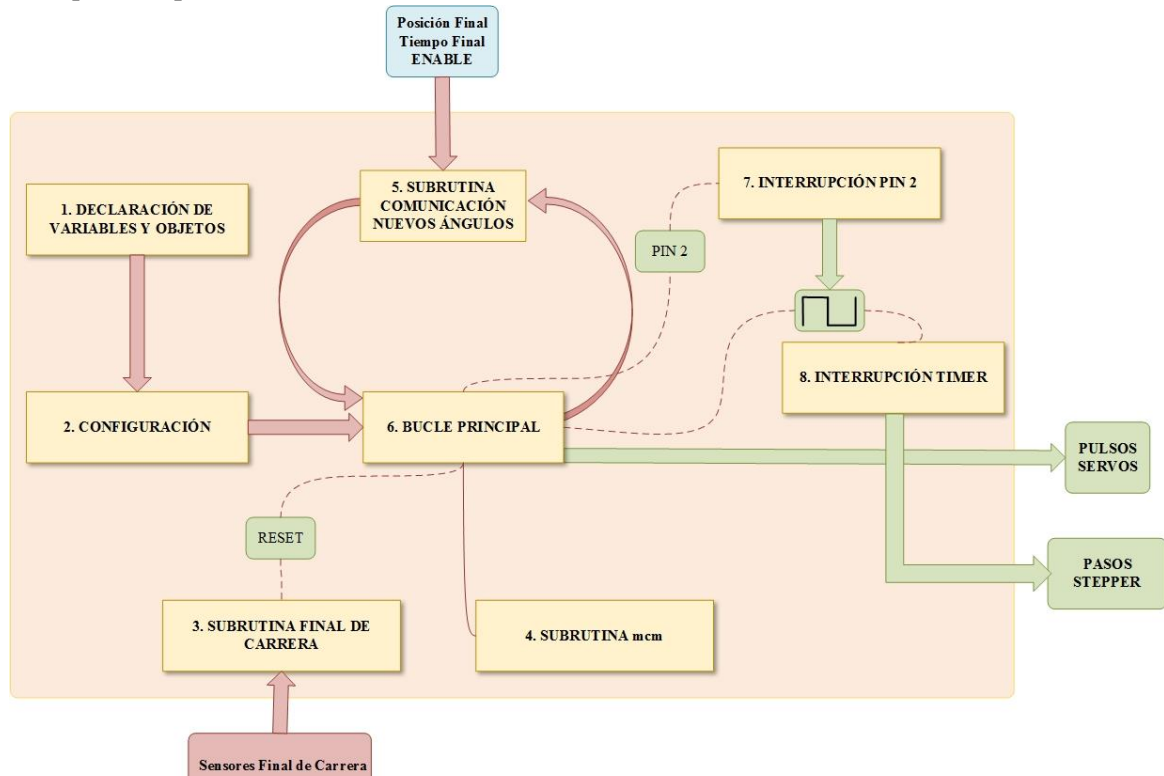


Figura 52. Software de control. Diagrama de Bloques

10.3 HARDWARE DE CONTROL

Por último, se realiza un montaje Hardware, mediante una placa de circuitos y los diferentes elementos electrónicos indicados anteriormente. En la *Figura 53* se muestra dicho montaje.

Como se puede observar, los motores Stepper con sus Drivers de control y los Servomotores están alimentados con una fuente de tensión de 7 V. mientras que el resto del circuito tiene una alimentación de 3,3 V. Se ha añadido un pulsador de Reset, para inicializar el Brazo Robótico. Se incluyen también los tres sensores de final de carrera, a la izquierda del montaje, y un Arduino NANO para la comunicación de los nuevos ángulos, además del Arduino MEGA (Atmel Corporation, 2016) para el control global. El esquemático del montaje se incluye en el *Anexo 5*.

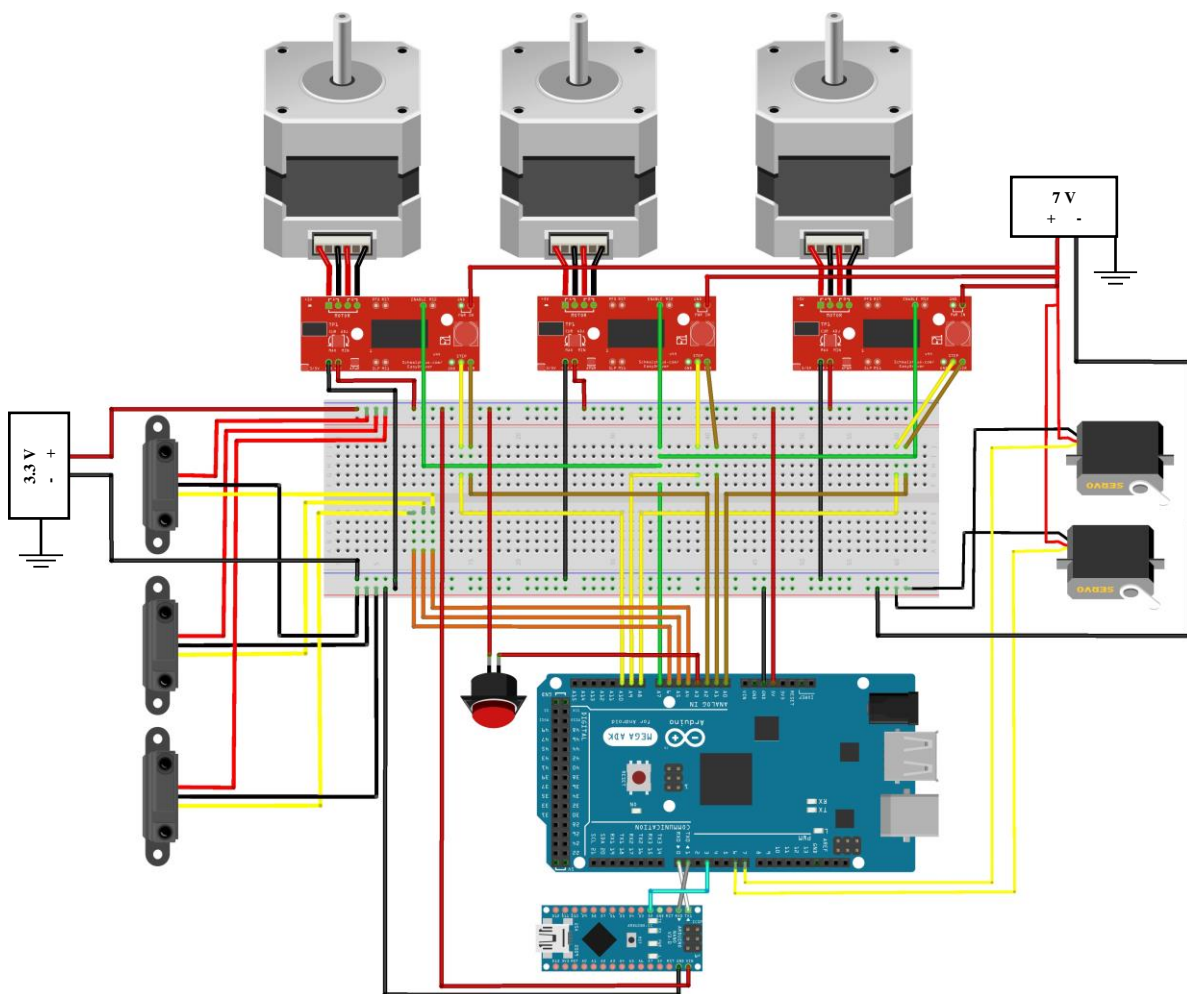


Figura 53. Implementación Hardware

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo, se han aplicado los conocimientos y herramientas adquiridas durante todo el Grado de Tecnologías Industriales, tales como el análisis de mecanismos, diseño de componentes y ensamblajes 3D, o creación de algoritmos de programación y circuitos electrónicos. Todo ello ha permitido alcanzar los siguientes Objetivos propuestos:

- ❖ Diseño de un Robot Antropomórfico capaz de posicionar su elemento terminal con velocidad y precisión necesarias para alcanzar las especificaciones planteadas.
- ❖ Selección de los motores necesarios, con las restricciones económicas indicadas, que permiten alcanzar el Par Motor necesario en todos sus ejes.
- ❖ Realización de los planos de todos los componentes necesarios para su construcción futura, de acuerdo a los diseños indicados.
- ❖ Diseño de un Sistema de Control simultaneo de los motores, mediante elementos electrónicos de bajo coste y fácil implementación.

Se ha estimado el coste de este Brazo Robótico en 300 €, basándose en precios estándar en el mercado de los elementos que lo componen. Por tanto, cumple su objetivo de bajo coste que, junto con el diseño orientado a una construcción sencilla, acercan este prototipo al usuario aficionado. Es por tanto una plataforma que promueve la iniciación en el mundo de la robótica y la electrónica, sin excesivo coste económico.

En cuando al trabajo desarrollado, se ha iniciado en el mes de septiembre de 2015, prolongándose hasta agosto de 2016. Durante este periodo, se han realizado reuniones periódicas entre el director de éste TFG y los cuatro alumnos implicados en el Proyecto, con el ánimo de avanzar de manera conjunta y abordar los problemas de cada trabajo de una manera global, teniendo en cuenta las posibles implicaciones que una solución podría tener en las demás partes del conjunto. Esta metodología se ha revelado altamente eficiente, pues las aportaciones de todos los componentes del grupo han sido de gran ayuda para el desarrollo final de este trabajo, a pesar de las diferencias y discusiones presentes, como en todos los grupos de trabajo.

Tras la conclusión de éste Trabajo Fin de Grado, se plantean los siguientes objetivos para un trabajo futuro:

- ❖ Diseño de un sistema de control en Bucle Cerrado, introduciendo en el Brazo Robótico los sensores angulares necesarios para el mismo, así como la modificación del Programa de Control de los motores incorporando como Input la información de dichos sensores.
- ❖ Aumento de la precisión mediante la introducción de micropasos en el movimiento de los motores, adecuando el Software y el Hardware de Control para ello.
- ❖ Construcción del Brazo Robótico de acuerdo a las especificaciones indicadas, aunando las aportaciones de los cuatro Trabajos Fin de Grado que constituyen el conjunto del mismo.
- ❖ Posibilidad de modificación de las piezas del Brazo Robótico para su construcción mediante impresora 3D, valorando las implicaciones de resistencia y peso que tendría en el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (Septiembre de 2015). *IRB 2400. ABB Robotics*. Obtenido de <http://www.new.abb.com/products>
- Arduino. (Marzo de 2016). Obtenido de www.playground.arduino.cc
- Atmel Corporation. (Marzo de 2016). Obtenido de <http://www.atmel.com/devices/ATMEGA640.aspx>
- Atmel Corporation. (Junio de 2016). *AVR446: Linear speed control of stepper motor*. Obtenido de <http://www.atmel.com/images/doc8017.pdf>
- Automation Direct. (Octubre de 2015). *SureStep Manual*. Obtenido de www.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanual
- Bai, S., & Hansen, M. R. (18 de Junio de 2007). Modelling of a Spherical Robotic Wrist. Besanc, on, Dinamarca.
- Bajd, T., Mihelj, M., Lenarcic, J., Stanovnic, A., & Munih, M. (2010). *Robotics*. Ljubljana: Springer.
- Barrientos, A., Peñín, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de la Robótica*. Mc Graw Hill.
- Condit, R., & Jones, D. W. (Diciembre de 2015). *Microchip Technology Inc. Stepping Motors Fundamentals*. Obtenido de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00907a.pdf>
- Diotronic. (Mayo de 2016). Obtenido de http://www.diotronic.com/microrruptor-palanca-35mm-16a_23415/
- Kenneth I., J. (1999). *BRESHENHAM'S ALGORITHM*. University of California, Davis: Department of Computer Science.
- Lladó Paris, J., & Sanchez Tabuenca, B. (2013). *MECÁNICA. Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales*. Zaragoza: Copy Center Digital.
- Ollero Baturone, A. (2001). *ROBÓTICA. Manipuladores y Robots Móviles*. Barcelona: Marcombo.
- Serrano Nicolás, A. (2013). *Cálculo y Selección de Elementos de Máquinas*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Transmisiones Zaragoza S.L. (Mayo de 2016). *Catálogo Poleas dentadas. Transmisiones Zaragoza*. Obtenido de <http://www.traza.es>
- Ur-Rehmann, R., Caro, S., Chablat, D., & Wenger, P. (16 de Marzo de 2009). Kinematic and Dynamic Analysis of the 2-DOF Spherical Wrist of. Institut de Recherche en Communication et Cybernétique, Nantes, Francia.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuraciones más frecuentes en Cadena Cinemática Abierta. (Ollero Baturone, 2001)	9
Figura 2. Robot Paralelo. (Ollero Baturone, 2001)	10
Figura 3. Robot planos coincidentes frente planos paralelos. (Ollero Baturone, 2001)	11
Figura 4. Robot ABB sin contrapeso y con contrapeso. (ABB, 2015)	11
Figura 5. Colocación de motores en Robot Angular. (Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil, 2007)	12
Figura 6. Aproximación de la trayectoria de la pelota	13
Figura 7. Primera aproximación Área de Trabajo	13
Figura 8. Esquema Básico Robot 5 Grados de Libertad	15
Figura 9. Esquema Longitud de Brazos 2 y 3	15
Figura 10. Brazo Robótico RRR No Equilibrado	18
Figura 11. Brazo Robótico RRR Equilibrado	20
Figura 12. Esquema Longitud de Brazos 2 y 3 en Brazo Reducido	23
Figura 13. Brazo Robótico Equilibrado de dimensiones reducidas	24
Figura 14. Brazo Robótico con Tirante	25
Figura 15. Alojamiento Motor 1	28
Figura 16. Alojamiento Motor 2	29
Figura 17. Alojamiento Motor 3	29
Figura 18. Alojamiento Motor 4	30
Figura 19. Alojamiento Motor 5	31
Figura 20. Alojamientos de los diferentes Rodamientos	32
Figura 21. Vista en Sección Montaje Eje 1	33
Figura 22. Transmisión por correa Eje 1	34
Figura 23. Transmisión por engranaje Eje 2	35
Figura 24. Sensor Mocrorruptor Palanca Diotronic	36
Figura 25. Final de Carrera Eje 1	36
Figura 26. Final de Carrera Eje 2	36
Figura 27. Final de Carrera Eje 3	37
Figura 28. Modelo del Brazo Robótico en Solidworks	38
Figura 29. Ensamblaje Sólido 0 (Bancada)	38
Figura 30. Ensamblaje Sólido 1 (Base)	39
Figura 31. Ensamblaje Sólido 2 (Brazo 2)	39
Figura 32. Ensamblaje Sólido 3 (Brazo 3)	40
Figura 33. Ensamblaje Sólidos 4 y 5 (Muñeca y Pala)	40
Figura 34. Distancias principales y restricciones angulares del Brazo Robótico	41
Figura 35. Volumen Alcanzable	41
Figura 38. Definición del Espacio de Trabajo	42
Figura 39. Espacio de Trabajo Final	42
Figura 40. Esquema simplificado del Brazo Robótico	43
Figura 41. Esquema de Cambio de Bases	43
Figura 42. Análisis Dinámico. Esquema de resolución	44
Figura 43. Distribución de desplazamientos y tensiones en el Brazo 3	46
Figura 44. Distribución de desplazamientos y tensiones en el Brazo 2	47
Figura 45. Distribución de desplazamientos y tensiones en el Tirante 3. Dos diseños	47
Figura 46. Distribución de tensiones en el Tirante 1. Varios diseños	48
Figura 47. Distribución de desplazamientos y tensiones. Alojamiento Motor 2	49
Figura 48. Distribución de desplazamientos y tensiones. Alojamiento Motor 3	49
Figura 49. Distribución de desplazamientos y tensiones en la Base	50

Figura 50. Distribución de desplazamientos y tensiones en la Bancada	51
Figura 51. Arduino MEGA. Diagrama PINOUT y Circuito Integrado.....	52
Figura 52. Drivers de Control	52
Figura 53. Esquema inicial de Control.....	53
Figura 54. Software de control. Diagrama de Bloques	53
Figura 55. Implementación Hardware.....	54
Figura 56. Determinación de la anchura W del Espacio de Juego	63
Figura 57. Esquema general con contrapesos	65
Figura 58. Esquema de masas brazo 3	66
Figura 59. Perfil Brazos 2 y 3	66
Figura 60. Esquema de masas brazo 2	67
Figura 61. Sólido 4. Fuerzas y Momentos	76
Figura 62. Sólido 3. Fuerzas y Momentos	76
Figura 63. Sólido 1. Fuerzas y Momentos	77
Figura 64. Sólido 2. Fuerzas y Momentos	77
Figura 65. Sólido 5. Fuerzas y Momentos	78
Figura 66. Sólido 6. Fuerzas y Momentos	78
Figura 67. Sólido 0. Fuerzas y Momentos	79
Figura 68. Software de control. Diagrama de Bloques	91
Figura 69. Máquina de Estados	95
Figura 70. Esquemático Hardware de Control	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa Tipos de Brazo Robótico	10
Tabla 2. Relación Motores y Articulaciones	17
Tabla 3. Gráficas de Par. Primer diseño.....	19
Tabla 4. Cálculos de Par. Brazo Robótico RRR No Equilibrado.....	20
Tabla 5. Gráficas de Par. Segundo diseño.....	21
Tabla 6. Cálculos de Par. Brazo Robótico RRR Equilibrado.....	22
Tabla 7. Gráficas de Par. Tercer diseño	24
Tabla 8. Cálculos de Par. Brazo Robótico RRR Equilibrado Pequeño	25
Tabla 9. Gráficas de Par. Cuarto diseño.....	26
Tabla 10. Cálculos de Par. Brazo Robótico con Tirante. Giro Relativo	27
Tabla 11. Cálculos de Par. Brazo Robótico con Tirante. Giro Absoluto	30
Tabla 12. Elección de Rodamientos	32
Tabla 13. Transmisión por correa. Parámetros.....	34
Tabla 14. Transmisión por Engranaje. Parámetros	35
Tabla 15. Comparación de Resultados	45
Tabla 16. Fuerzas de Enlace e Inercia. Brazo 3	46
Tabla 17. Fuerzas de Enlace e Inercia. Brazo 2	47
Tabla 18. Resultados del Estudio de Tensiones para diferentes perfiles en el Sólido 7.....	48
Tabla 19. Resultados del Estudio de Desplazamientos y Tensiones para los Asientos del Motor 2 y Motor 3.....	49
Tabla 20. Fuerzas de Inercia. Base.....	50
Tabla 21. Posibles Motores	65
Tabla 22. Motores seleccionados	66
Tabla 23. Contrapesos adicionales	67
Tabla 24. Resultados de longitud y masa de contrapesos	68
Tabla 25. Resultados de masa contrapeso con un brazo de 100 mm	68

Tabla 26. Resultados contrapeso Articulación 2.....	69
Tabla 27. Esfuerzos Axiales y Radiales totales.....	70
Tabla 28. Peso equivalente y Carga Dinámica.....	71
Tabla 29. Rodamiento escogido y Carga Estática.....	71
Tabla 30. Fuerzas Axiales y Radiales	72
Tabla 31. Carga Estática, Carga Dinámica, Relación C/P. Rodamientos de bolas	73
Tabla 32. Horas de funcionamiento por Tipo de Máquina.....	73

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1. Distancia de impacto en el eje X.....	14
Gráfico 2. Perfil de velocidad de los motores	17
Gráfico 3. Gráficas de Par Motor con respecto al tiempo	45
Gráfico 4. Curva de Velocidad.....	70

ANEXOS

ANEXO 1. ESPACIO DE TRABAJO

En este anexo se explicitan los cálculos realizados para determinar la primera aproximación del Espacio de Trabajo (*Sección 2*), y el cálculo del Espacio de Trabajo Final (*Sección 7*).

1.1 CÁLCULO DEL PARÁMETRO L

En primer lugar, se utilizará el programa de cálculo Matlab para obtener la longitud en X de la trayectoria parabólica de la pelota, variando el ángulo de inclinación respecto a la horizontal, el ángulo de desvío respecto al plano central y la velocidad de la pelota tras el choque con la pared.

Se implementan las ecuaciones de tiro parabólico en el programa, tal como se indica a continuación. Se definen las constantes de posición inicial, gravedad, ángulos máximos de inclinación y desvío, velocidad máxima y mínima, y número de iteraciones. Se define también el vector `x_sol`, que almacenará la distancia en x solución, para cada iteración de los valores anteriormente mencionados.

Puesto que se realizan variaciones de los ángulos de 0° a 30° (en 8 intervalos en el caso del parámetro beta, y en 5 en el caso del parámetro alfa), y variaciones en la velocidad de 200 cm/s a 300 cm/s (en 5 intervalos), el número total de resultados es de 200.

```
%Constantes
x=0;
y=0;
z=0;
g=980; %cm/s^2
Zo= 100; %cm
Yo= 0; %cm
Xo= 0; %cm
alfamax= 30; %deg
betamax= 30; %deg
Vmin=200; %cm/s
Vmax=300; %cm/s
V(1)=Vmin;
deg=pi/180;
tmax=100;
dmax=140;
imax=4;
jmax=10;
k=1;
kmax=4;
paso=(Vmax-Vmin)/kmax;
syms a;
x_sol = zeros(imax+1,jmax+1,kmax+1);
```

A continuación, se implementan las ecuaciones de posición de tiro parabólico, en cada uno de los ejes X, Y, Z. Igualando a cero la componente Z de la posición, se resuelve la ecuación en la componente X, obteniéndose la distancia que recorre la pelota desde el punto de golpeo con la pared hasta el contacto con el suelo. Las ecuaciones de tiro parabólico son las siguientes:

$$X_f = X_0 + V_{0x} * t = X_0 + V_0 * \cos\alpha * \cos\beta * t$$

$$Y = Y_0 + V_{0y} * t = Y_0 + V_0 * \cos\alpha * \sin\beta * t$$

$$Z_f = Z_0 + V_{0z} * t - \frac{1}{2}gt^2 = Z_0 + V_0 * \sin\alpha * t - \frac{1}{2}gt^2$$

```

%Ecuaciones
% z(t) = Zo+V*sin(alfa*deg)*(t-1)-g/2*(t-1)^2;
% x(t) = Xo+V*cos(alfa*deg)*cos(beta*deg)*t;
% y(t) = Yo+V*cos(alfa*deg)*sin(beta*deg)*t;
for k=1:kmax+1
    for i=1:imax+1
        beta(i)=(i-1)/imax*betamax;
        for j=1:jmax+1
            alfa(j)=(j-1)/jmax*alfamax;
            for d=1:dmax
                x(d,j) = d-1;
                k1 = tan(alfa(j)*deg)/cos(beta(i)*deg);
                k2 = g/(2*V(k)^2*(cos(alfa(j)*deg))^2*(cos(beta(i)*deg))^2);
                z(d,j) = Zo+k1*(d-1)-k2*(d-1)^2;
                y(d,j) = Yo+tan(beta(i)*deg)*(d-1);
                x_sol(i,j,k)=(k1+sqrt(k1^2+4*Zo*k2))/(2*k2);
            end
            figure(i);
            plot(x,z)
            angulo = beta(i);
            title(angulo);
            axis([0,200,0,120]);
            grid on;
            xlabel('x');
            ylabel('z');
        end
    end
    V(k+1)=V(k)+paso;

```

Por último, para facilitar el tratamiento de datos, se obtienen los valores máximo y mínimo de la distancia en X, comparando todas las iteraciones realizadas anteriormente. Asimismo, se calcula el Espacio de Trabajo del Robot, partiendo de las medidas previamente fijadas W y H.

```

%Cálculo de X mínimo y Y máximo
x_min = 500;
x_max = 0;
for k=1:kmax+1
    for i=1:imax+1
        for j=1:jmax+1
            if (x_sol(i,j,k) < x_min)
                x_min = x_sol(i,j,k);
            end
            if (x_sol(i,j,k) > x_max)
                x_max = x_sol(i,j,k);
            end
        end
    end
end
x_min
x_max

%Cálculo del Area de Trabajo y dimensiones del robot
L=x_max-x_min;
W=167;
H=30;
Vol=L*H*W/1000000

%Robot Angular
Vol_6R=(33*L^3/1000000)/4
Coc_6R=Vol6R/Vol

```

El punto más cercano a la pared se encuentra a 78,25 cm y el más alejado a 163,7 cm. Por tanto, se puede realizar una primera estimación de $L = 163,7 - 78,25 = 85,5$ cm.

1.2 CÁLCULO DEL PARÁMETRO W

Para calcular la anchura del área de juego, se supone un Área de Impacto en la pared de 30 cm de lado, a 1 m de la horizontal, como se muestra en la *Figura 54*. A continuación, se calcula el parámetro W a partir del caso más desfavorable (beta=30 grados), mediante trigonometría.

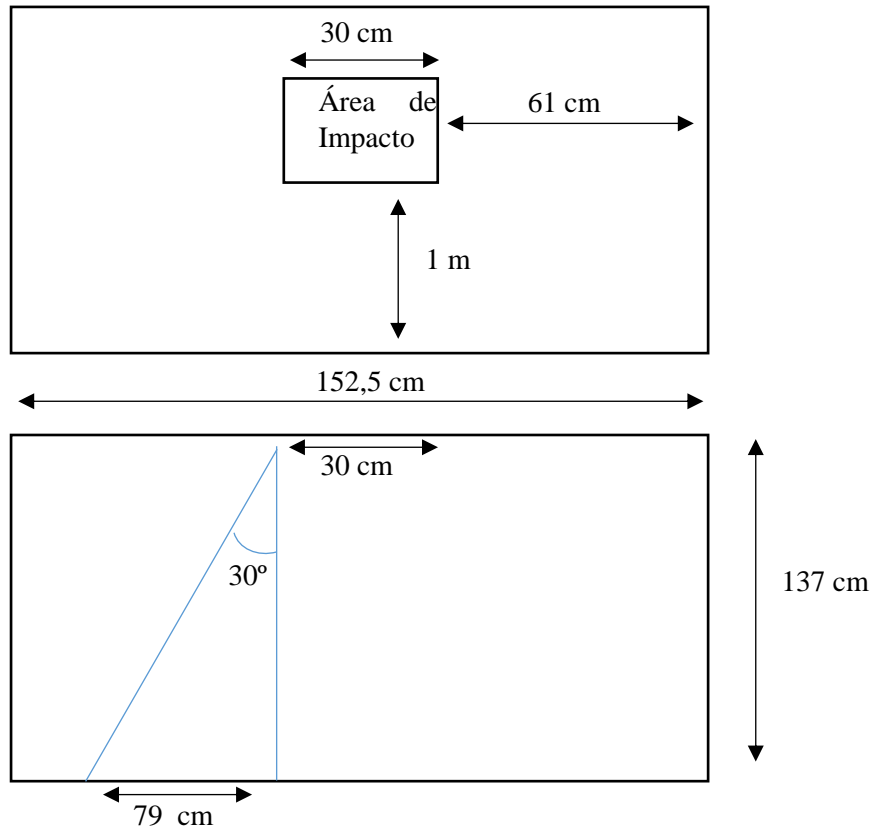


Figura 54. Determinación de la anchura W del Espacio de Juego

Con esto, se obtiene una anchura total de **W=137cm**.

1.3 CÁLCULO DEL ESPACIO DE TRABAJO FINAL

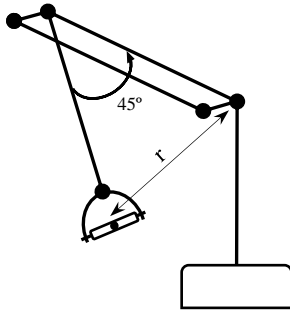
En este apartado, se explicitan los cálculos para definir el Espacio de Trabajo Final del Brazo Robótico.

Los pasos seguidos para calcular el Volumen Total son los siguientes:

1. Volumen Esfera Exterior

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 0,685^3 = 1,346 \text{ m}^3$$

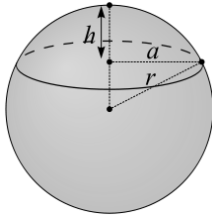
2. Volumen esfera interior



$$r = 2 \cdot 342,5 \cdot \sin 22,5 = 262,13 \text{ mm}$$

$$V_2 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \cdot 0,26213^3 = 0,075 \text{ m}^3$$

3. Volumen casquete esférico delimitado por la Esfera Exterior y la mesa de juego



$$V_3 = \frac{\pi h^2}{3} (3r - h) = \frac{\pi \cdot 0,385^3}{3} (3 \cdot 0,685 - 0,385) = 0,2592 \text{ m}^3$$

4. Volumen Total

$$V_T = \frac{1}{2} (V_2 - V_1 - V_3) = 0,5057 \text{ m}^3$$

Tras definir el Espacio Alcanzable, se delimita el Espacio de Juego, como se indica en la Sección 7. Los pasos para ello son los siguientes:

Optimización del área de la base

$$\left. \begin{aligned} d^2 &= x^2 + \frac{y^2}{4} \\ A_{max} &= x \cdot y \end{aligned} \right\} A_{max} = x \cdot \sqrt{4(d^2 - x^2)} \Rightarrow \frac{d}{dx} A'_{max} = -\frac{4(x^2 - \frac{d^2}{2})}{\sqrt{d^2 - x^2}}$$

Resolviendo $A'_{max} = 0$, máximo de la función, sabiendo que $d = 615,77 \text{ mm}$:

$$A'_{max} = 0 \Rightarrow 4 \left(x^2 - \frac{d^2}{2} \right) = 0 \Rightarrow x = \sqrt{\frac{d^2}{2}} = \sqrt{\frac{615,77^2}{2}} = 435,41 \text{ mm}$$

$$y = \sqrt{4(d^2 - x^2)} = 870,84 \text{ mm}$$

Cálculo de la altura

$$685^2 = h_1^2 + 435,41^2 \Rightarrow h_1 = \sqrt{685^2 - 435,41^2} = 528,81 \text{ mm}$$

$$h = h_1 + h_2 = 528,81 + 300 = 828,81 \text{ mm}$$

ANEXO 2. CÁLCULO DE CONTRAPESOS

En este anexo se explicita el cálculo de los contrapesos necesarios para equilibrar el Brazo Robótico planteado en la *Sección 3*. Se va a realizar un equilibrado de masas mediante los propios motores de las articulaciones, añadiendo peso extra cuando sea necesario.

Para contemplar las opciones posibles en cuanto a la relación par - peso, se valorarán tres posibles motores paso a paso. En la *Tabla 21* se presentan sus características de par máximo y peso.

TIPO	REFERENCIA	PESO	PAR MÁXIMO
NEMA 17	STP-MTR-17048	210 gr.	440 Nmm
NEMA 23	STP-MTR-23055	457 gr.	920 Nmm
NEMA 23	STP-MTR-23079	1000 gr.	1900 Nmm

Tabla 21. Posibles Motores

El equilibrado de cada brazo se realizará desplazando el Centro de Masas del Sólido a su centro de giro, mediante el aumento de la longitud de la barra en el extremo contrario al Centro de Masas, y la adición de una masa en su punto final. Para ello, se utilizará la formulación del Centro de Masas en función de las masas puntuales de la barra, como se expresa en la siguiente fórmula:

$$r_{CM} = \frac{\sum m_i \cdot r_i}{\sum m_i} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

r_{CM} : Centro de Masas

m_i : masa puntual i

r_i : distancia de m_i al origen

En primer lugar, se calculará el equilibrado del brazo 3, y posteriormente el del brazo 2. En la *Figura 55* se presenta un esquema de la solución planteada.

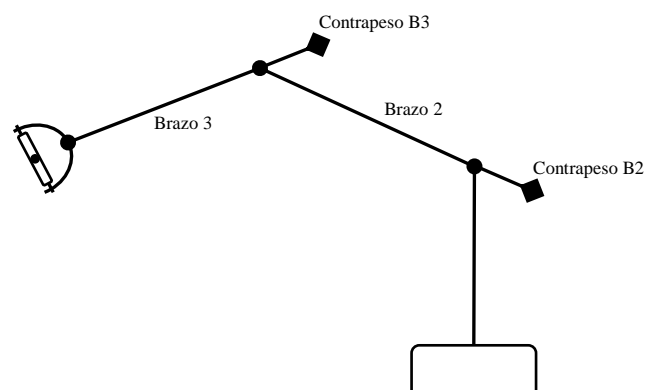


Figura 55. Esquema general con contrapesos

2.1 EQUILIBRADO DEL BRAZO 3

Las masas a considerar en este brazo son: masa del elemento terminal (pala), peso propio del brazo, peso propio del tramo de brazo añadido y masa del motor que actúa como contrapeso. Se muestra un esquema con las posiciones relativas de las masas con respecto al centro de giro, a partir de las dimensiones definidas en la Sección 3. En la Figura 56 se muestra dicha distribución.

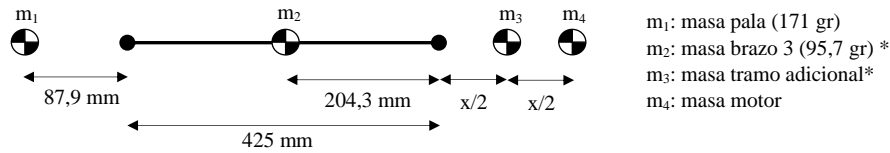


Figura 56. Esquema de masas brazo 3

* Las masas de los brazos, tanto los originales como los adicionales, se calculan a partir del perfil del brazo y la densidad del material (aluminio, 2790 kg/m^3), como se muestra en la Figura 57.

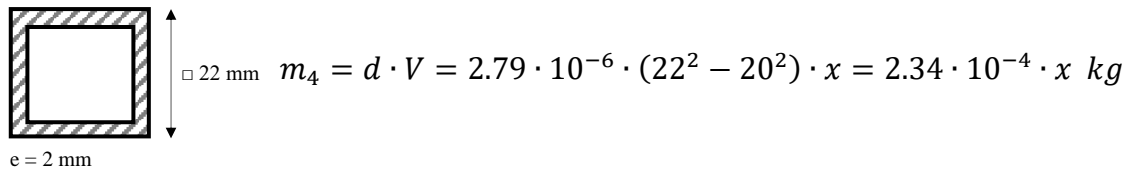


Figura 57. Perfil Brazos 2 y 3

Una vez determinadas las masas y distancias, se calcula el Centro de Masas con respecto al eje de giro, y se iguala a cero para calcular la distancia a la que debería colocarse el motor para que, actuando como contrapeso, equilibre el sistema.

$$r_{CM} = \frac{\sum m_i \cdot r_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2 + m_3 \cdot r_3 + m_4 \cdot r_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} = 0$$

$$0 = \frac{0.171 \cdot (-512.9) + 0.0957 \cdot (-204.3) + (2.34 \cdot 10^{-4} \cdot x) \cdot \frac{x}{2} + m_4 \cdot x}{0.171 + 0.0957 + 2.34 \cdot 10^{-4} \cdot x + m_4}$$

Resolviendo para los diferentes valores de la masa m_4 (masa del motor), obtenemos las siguientes longitudes de brazo adicional, indicadas en la Tabla 22.

REFERENCIA	PESO	Longitud x
NEMA 17048	210 gr.	414,76 mm
NEMA 23055	457 gr.	221,62 mm
NEMA 23079	1000 gr.	105,944 mm

Tabla 22. Motores seleccionados

Como se puede observar, en los dos primeros casos la longitud del brazo adicional es demasiado grande, por lo que sería necesario añadir un contrapeso adicional para reducirla. Para ello, se calcula el peso necesario para equilibrar el sistema, limitando la longitud del brazo adicional a 100 mm.

Tras sustituir en la *Ecuación 1* el valor de 100 mm, obtenemos que es necesario un contrapeso de **1,0608 kg**. Por tanto, el peso adicional a añadir a cada motor es el indicado en la *Tabla 23*.

REFERENCIA	PESO	PESO ADICIONAL
NEMA 17048	210 gr.	851 gr.
NEMA 23055	457 gr.	603 gr.

Tabla 23. Contrapesos adicionales

2.2 EQUILIBRADO DEL BRAZO 2

El equilibrado del Brazo 2 se va a realizar partiendo de los resultados del apartado anterior. Se valorarán dos opciones: motor actuando como contrapeso y motor en eje de giro y contrapeso adicional. Ambas opciones deben ser consideradas, puesto que, aunque la primera reduzca el peso total de la estructura, la segunda es más sencilla constructivamente. Para ambas opciones, el esquema de masas es el mismo, como se muestra en la *Figura 58*.

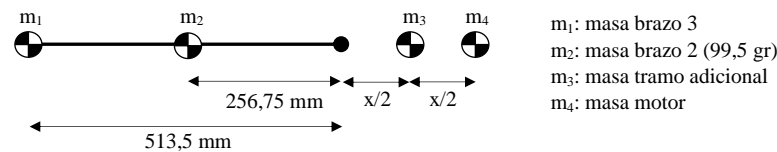


Figura 58. Esquema de masas brazo 2

1. Motor actuando como contrapeso

A partir de los datos, aplicando la *Ecuación 1*, obtenemos los valores de longitud de brazo adicional para compensar el peso del Sistema, para distintos valores de m_1 (masa del brazo 3).

$$r_{CM} = \frac{\sum m_i \cdot r_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2 + m_3 \cdot r_3 + m_4 \cdot r_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} = 0$$

$$0 = \frac{m_1 \cdot (-513.5) + 0.0995 \cdot (-256.75) + (2.34 \cdot 10^{-4} \cdot x) \cdot \frac{x}{2} + m_4 \cdot x}{m_1 + 0.0957 + 2.34 \cdot 10^{-4} \cdot x + m_4}$$

Se considera únicamente la opción de NEMA 23 (en sus dos variantes) para el brazo 2, por no tener el NEMA 17 el par necesario, a priori, para cumplir con las especificaciones. Obtenemos los siguientes resultados, expresados en la *Tabla 24*.

MOTOR BRAZO 3	m_1	MOTOR BRAZO 2	Longitud x
NEMA 17048	573,9 gr.	NEMA 23055	603,92 mm
		NEMA 23079	308,16 mm
NEMA 23055	776,6 gr.	NEMA 23055	772,08 mm
		NEMA 23079	404,24 mm
NEMA 23079	1291,5 gr.	NEMA 23055	1158,69 mm
		NEMA 23079	639,86 mm
Contrapeso a 100 mm	1350,9 gr.	NEMA 23055	1200,24 mm
		NEMA 23079	666,31 mm

Tabla 24. Resultados de longitud y masa de contrapesos

Como se puede observar, el resultado es similar al obtenido en el equilibrado del brazo 3, ya que las longitudes de brazo adicional son demasiado grandes como para mantener la funcionalidad del Brazo Robótico. Por tanto, se procederá igualmente a calcular el contrapeso necesario para obtener una longitud de brazo adicional de 100 mm. Los resultados se indican en la *Tabla 25*.

MOTOR BRAZO 3	MOTOR BRAZO 2	CONTRAPESO	PESO ADICIONAL
NEMA 17048	NEMA 23055	3,18 kg	2,722 kg
	NEMA 23079		2,18 kg
NEMA 23055	NEMA 23055	4,22 kg	3,762 kg
	NEMA 23079		3,2 kg
NEMA 23079	NEMA 23055	6,86 kg	6,402 kg
	NEMA 23079		5,86 kg
Contrapeso a 100 mm	NEMA 23055	7,17 kg	6,712 kg
	NEMA 23079		6,17 kg

Tabla 25. Resultados de masa contrapeso con un brazo de 100 mm

2. Motor en el eje de giro

Por último, se estudia la posibilidad de colocar el motor de la articulación 2 en el eje de giro, siendo necesario en ese caso un contrapeso adicional. Se calcula directamente el contrapeso necesario para tener una longitud de brazo adicional de 100 mm, para los cuatro casos estudiados en el Brazo 3. Los resultados se muestran en la *Tabla 26*.

$$r_{CM} = \frac{\sum m_i \cdot r_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \cdot r_1 + m_2 \cdot r_2 + m_3 \cdot r_3 + m_4 \cdot r_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} = 0$$

$$0 = \frac{m_1 \cdot (-513.5) + 0.0995 \cdot (-256.75) + (2.34 \cdot 10^{-4} \cdot 100) \cdot \frac{100}{2} + m_4 \cdot 100}{m_1 + 0.0957 + 2.34 \cdot 10^{-4} \cdot 100 + m_4}$$

MOTOR BRAZO 3	CONTRAPESO (m₄)
NEMA 17048	3,18 kg
NEMA 23055	4,22 kg
NEMA 23079	6,86 kg
Contrapeso a 100 mm	7,17 kg

Tabla 26. Resultados contrapeso Articulación 2

Tras valorar todas las opciones anteriormente expuestas, se sacan las siguientes **conclusiones**. Como se puede observar, considerando la opción más acorde con las especificaciones (contrapesos a 100 mm del eje de giro), el Brazo Robótico aumenta su peso en **8,52 kg**. Si bien es cierto que este peso adicional no se traslada a ningún motor, sino que es la bancada quien lo absorbe, se deberán considerar otras alternativas que ofrezcan un diseño más ligero y con menor inercia.

ANEXO 3. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

En este anexo se explicita el cálculo de los rodamientos escogidos para cada eje del Brazo Robótico.

En la *Tabla 30* se presentan las Fuerzas Axiales y Radiales en cada eje, divididas en tres tramos: Aceleración, velocidad constante y deceleración. Se ha escogido el mismo perfil de velocidades en cada motor que el elegido para calcular los pares motores de cada articulación, indicado en el *Gráfico 4*.

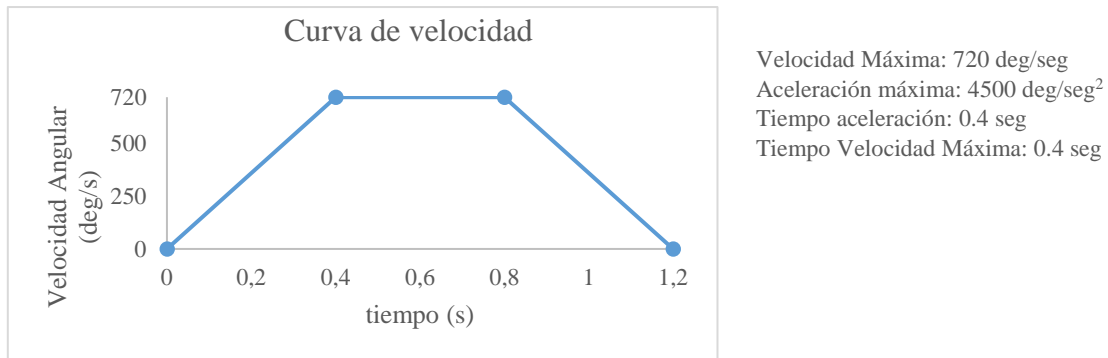


Gráfico 4. Curva de Velocidad

A partir de las fuerzas axiales y radiales en cada tramo, se calcula una fuerza axial y radial global, teniendo en cuenta los tiempos y velocidades angulares, como se indica en la siguiente fórmula:

$$F_m = \sqrt[3]{\frac{F_1^3 * n_1 * t_1 + F_2^3 * n_2 * t_2 + F_3^3 * n_3 * t_3}{n_1 * t_1 + n_2 * t_2 + n_3 * t_3}}$$

Por tanto, se obtienen los siguientes esfuerzos axiales y radiales en cada eje (no se han incluido los ejes 4 y 5, correspondientes a la muñeca, por no necesitar estos rodamientos para su correcto funcionamiento). Los resultados quedan reflejados en la *Tabla 27*.

Eje	Fa (N)	Fr (N)
1	48	20,32615
2	5,706221	19,44314
3	2,947225	16,68844
6	0,19661	1,367517
7	0,19661	1,367517

Tabla 27. Esfuerzos Axiales y Radiales totales

A continuación, se calculan los valores de Carga Estática y Carga Dinámica, y se realiza la elección del rodamiento óptimo para cada eje, según la metodología siguiente. Se ha utilizado la *Tabla 31* para obtener los datos necesarios para los cálculos.

3. Cálculo de la relación F_a/F_r
4. Obtención de X, Y a partir de los datos de la *Tabla 2*
5. Cálculo de P_{eq}

$$P_{eq} = X * F_r + Y * F_a$$

6. Estimación de las horas de funcionamiento (L), a partir de los datos proporcionados por la *Tabla 32*.

*A partir de las indicaciones de la *Tabla 32*, se escoge una duración de **500 horas**.

7. Obtención de la relación C/P_{eq} a partir de las horas de funcionamiento y la velocidad nominal.
8. Cálculo de C a partir de la relación C/P_{eq}
9. Comprobación de Carga Estática a partir de F_a/Co
10. Elección del rodamiento adecuado y comprobación

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la *Tabla 28* y *Tabla 29*.

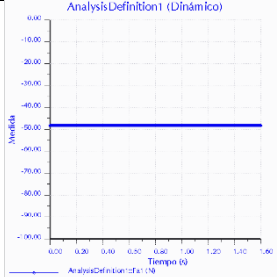
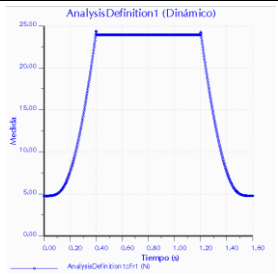
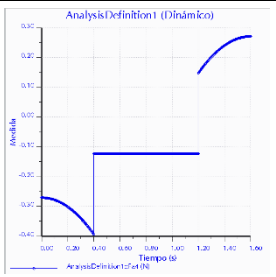
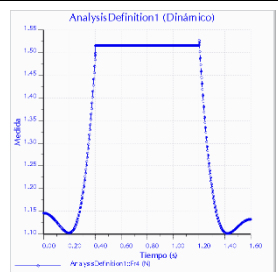
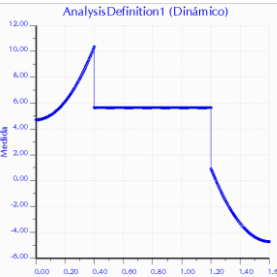
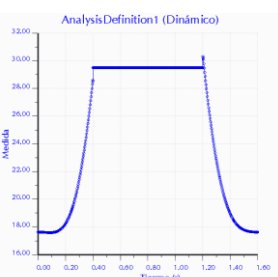
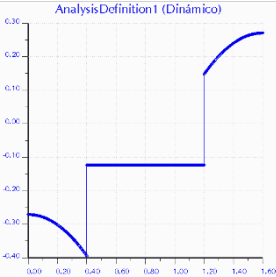
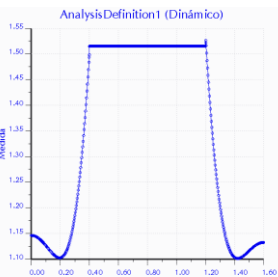
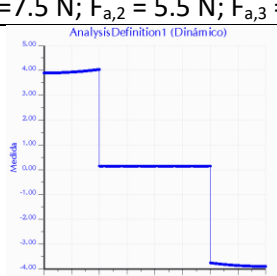
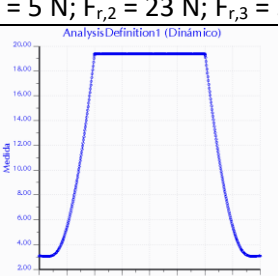
Eje	F_a/F_r	X	Y	P_{eq} (N)	C/P	C (N)
1	2,36149	0,35	0,57	28,38591	1,538	43,65752
2	0,293482	1	0	5,706221	1,538	8,776168
3	0,176603	1		2,947225	1,538	4,532832
6	0,143771	1	0	0,19661	1,538	0,302385
7	0,143771	1	0	0,19661	1,538	0,302385

Tabla 28. Peso equivalente y Carga Dinámica

Eje	Rodamiento escogido			
	Referencia	C (N)	Co (N)	F_a/Co
1	NSK 7201BEAT85	8500	3750	0,0128
2	608ZZ	3650	1400	0,004076
3	624ZZ	1630	560	0,005263
6	624ZZ	1630	560	0,000351
7	624ZZ	1630	560	0,000351

Tabla 29. Rodamiento escogido y Carga Estática

Tabla 30. Fuerzas Axiales y Radiales

EJE	FUERZA AXIAL	FUERZA RADIAL	EJE	FUERZA AXIAL	FUERZA RADIAL
1			4		
	$F_a = 48 \text{ N}$	$F_{r,1} = 14 \text{ N}; F_{r,2} = 23 \text{ N}; F_{r,3} = 14 \text{ N}$		$F_{a,1} = 0.3 \text{ N}; F_{a,2} = 0.1 \text{ N}; F_{a,3} = 0.2 \text{ N}$	$F_{r,1} = 1.1 \text{ N}; F_{r,2} = 1.5 \text{ N}; F_{r,3} = 1.1 \text{ N}$
2			5		
	$F_{a,1} = 7.5 \text{ N}; F_{a,2} = 5.5 \text{ N}; F_{a,3} = 2 \text{ N}$	$F_{r,1} = 5 \text{ N}; F_{r,2} = 23 \text{ N}; F_{r,3} = 5 \text{ N}$		$F_{a,1} = 0.3 \text{ N}; F_{a,2} = 0.1 \text{ N}; F_{a,3} = 0.2 \text{ N}$	$F_{r,1} = 1.1 \text{ N}; F_{r,2} = 1.5 \text{ N}; F_{r,3} = 1.1 \text{ N}$
3					
	$F_{a,1} = 4 \text{ N}; F_{a,2} = 0 \text{ N}; F_{a,3} = 4 \text{ N}$	$F_{r,1} = 11 \text{ N}; F_{r,2} = 19 \text{ N}; F_{r,3} = 11 \text{ N}$			

ANEXO 4. ANÁLISIS POR NEWTON

En el presente Anexo se detalla el cálculo realizado, apoyándose en la herramienta *Matlab*, para la resolución analítica del análisis cinemático y dinámico del Brazo Robótico objeto de este trabajo.

4.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO

Como se indica en la *Sección 8*, se detallan las condiciones de enlace, ecuaciones de velocidad y aceleración de los puntos más significativos del mecanismo.

1. Condiciones de Enlace

- Base Fija – Sólido 0: $\bar{V}_{abs}(O) = \bar{V}_{abs}(A) = \bar{0}$
- Sólido 0 – Sólido 1: $\bar{V}_{abs}(B_0) = \bar{V}_{abs}(B_1)$
- Sólido 1 – Sólido 2: $\bar{V}_{abs}(D_1) = \bar{V}_{abs}(D_2)$
- Sólido 2 – Sólido 3: $\bar{V}_{abs}(E_2) = \bar{V}_{abs}(E_3)$
- Sólido 3 – Sólido 4: $\bar{V}_{abs}(F_3) = \bar{V}_{abs}(F_4)$
- Sólido 2 – Sólido 5: $\bar{V}_{abs}(I_2) = \bar{V}_{abs}(I_5)$
- Sólido 5 – Sólido 6: $\bar{V}_{abs}(J_5) = \bar{V}_{abs}(J_6)$
- Sólido 6 – Sólido 0: $\bar{V}_{abs}(A_6) = \bar{V}_{abs}(A_0) = \bar{0}$

2. Ecuaciones de enlace de Velocidades

Tras obtener las relaciones entre sólidos, se expresan las ecuaciones de enlace de Velocidades y Aceleraciones, proyectadas en la Base Global 123^a.

$$\{\bar{V}_{abs}(A) = \bar{V}_{abs}(O) + \bar{\Omega}_{S0} \wedge \overline{OA}\}_{123a} \quad \bar{\Omega}_{S0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(B) = \bar{V}_{abs}(A) + \bar{\Omega}_{S0} \wedge \overline{AB}\}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(C) = \bar{V}_{abs}(B) + \bar{\Omega}_{S1} \wedge \overline{BC}\}_{123a} \quad \bar{\Omega}_{S1} = \begin{Bmatrix} -\dot{\phi} \\ 0 \\ -\dot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(D) = \bar{V}_{abs}(C) + \bar{\Omega}_{S1} \wedge \overline{CD}\}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(E) = \bar{V}_{abs}(D) + \bar{\Omega}_{S2} \wedge \overline{DE}\}_{123a} \quad \bar{\Omega}_{S2} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} - \dot{\phi} \\ 0 \\ -\dot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(F) = \bar{V}_{abs}(E) + \bar{\Omega}_{S3} \wedge \overline{EF}\}_{123a} \quad \bar{\Omega}_{S3} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dot{\eta} \\ 0 \end{Bmatrix}_{123c} + \begin{Bmatrix} \dot{\theta} - \dot{\phi} \\ 0 \\ -\dot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(I) = \bar{V}_{abs}(D) + \bar{\Omega}_{S2} \wedge \overline{DI}\}_{123a}$$

$$\{\bar{V}_{abs}(J) = \bar{V}_{abs}(A) + \bar{\Omega}_{S2} \wedge \overline{AJ}\}_{123a}$$

3. Ecuaciones de enlace de Aceleraciones

$$\{\bar{a}_{abs}(A) = \bar{a}_{abs}(O) + \bar{\Sigma}_{S0} \wedge \overline{OA} + \bar{\Omega}_{S0} \wedge (\bar{\Omega}_{S0} \wedge \overline{OA})\}_{123a}$$

$$\bar{\Sigma}_{S0} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\ddot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(B) = \bar{a}_{abs}(A) + \bar{\Sigma}_{S0} \wedge \overline{AB} + \bar{\Omega}_{S0} \wedge (\bar{\Omega}_{S0} \wedge \overline{AB})\}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(C) = \bar{a}_{abs}(B) + \bar{\Sigma}_{S1} \wedge \overline{BC} + \bar{\Omega}_{S1} \wedge (\bar{\Omega}_{S1} \wedge \overline{BC})\}_{123a}$$

$$\bar{\Sigma}_{S1} = \begin{Bmatrix} -\ddot{\phi} \\ 0 \\ -\ddot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(D) = \bar{a}_{abs}(C) + \bar{\Sigma}_{S1} \wedge \overline{CD} + \bar{\Omega}_{S1} \wedge (\bar{\Omega}_{S1} \wedge \overline{CD})\}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(E) = \bar{a}_{abs}(D) + \bar{\Sigma}_{S2} \wedge \overline{DE} + \bar{\Omega}_{S2} \wedge (\bar{\Omega}_{S2} \wedge \overline{DE})\}_{123a}$$

$$\bar{\Sigma}_{S2} = \begin{Bmatrix} \ddot{\theta} - \ddot{\phi} \\ 0 \\ -\ddot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(F) = \bar{a}_{abs}(E) + \bar{\Sigma}_{S3} \wedge \overline{EF} + \bar{\Omega}_{S3} \wedge (\bar{\Omega}_{S3} \wedge \overline{EF})\}_{123a}$$

$$\bar{\Sigma}_{S3} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \ddot{\eta} \\ 0 \end{Bmatrix}_{123a} + \begin{Bmatrix} \ddot{\theta} - \ddot{\phi} \\ 0 \\ -\ddot{\psi} \end{Bmatrix}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(I) = \bar{a}_{abs}(D) + \bar{\Sigma}_{S2} \wedge \overline{DI} + \bar{\Omega}_{S2} \wedge (\bar{\Omega}_{S2} \wedge \overline{DI})\}_{123a}$$

$$\{\bar{a}_{abs}(J) = \bar{a}_{abs}(A) + \bar{\Sigma}_{S2} \wedge \overline{AJ} + \bar{\Omega}_{S2} \wedge (\bar{\Omega}_{S2} \wedge \overline{AJ})\}_{123a}$$

4.2 ANÁLISIS DINÁMICO

Una vez obtenidas las ecuaciones referentes al análisis cinemático, se procede a realizar el análisis dinámico del mecanismo. Para ello, como se indica en la *Sección 8*, se aplicarán equilibrios de Fuerzas y Momentos a todos los sólidos del mismo. Se presentan a continuación las Fuerzas y Momentos que intervienen en cada sólido, así como sus ecuaciones, en las siguientes figuras (*Figura 59 a Figura 65*).

1. Primer Conjunto

Para este conjunto, se resuelve cada sólido por separado, aplicando Sumatorio de Fuerzas y Momentos para obtener las Fuerzas de enlace entre sólidos y los Momentos motores necesarios.

Sólido 4

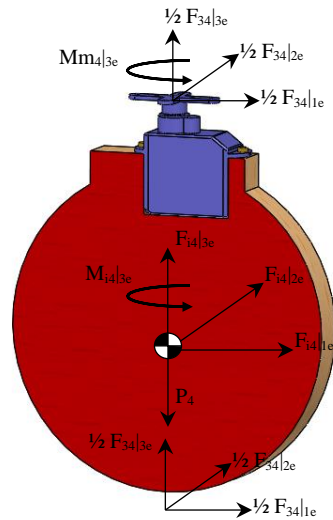


Figura 59. Sólido 4. Fuerzas y Momentos

$$\sum \bar{F} = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{F}_{34} + \bar{F}_{i4}\}_{123e} + \{\bar{P}_4\}_{123a} = \bar{0}$$

$$\sum \bar{M}(H_2) = \bar{0} \Rightarrow \left\{ \bar{M}_{i4} + \bar{M}_{m4} + \overline{H_2 G_4} \wedge \bar{F}_{i4} + \overline{H_2 H_1} \wedge \frac{\bar{F}_{34}}{2} \right\}_{123e} = \bar{0}$$

Sólido 3

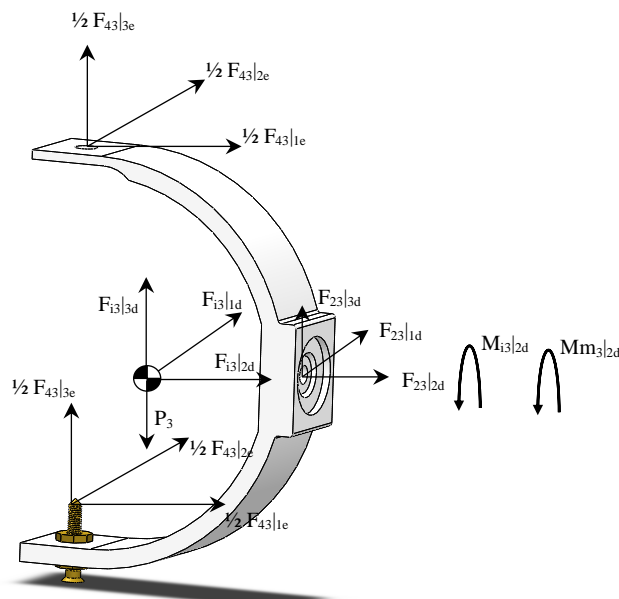


Figura 60. Sólido 3. Fuerzas y Momentos

$$\sum \bar{F} = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{F}_{43}\}_{123e} + \{\bar{F}_{23} + \bar{F}_{i3}\}_{123d} + \{\bar{P}_3\}_{123a} = \bar{0}$$

$$\sum \bar{M}(E) = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{M}_{i3} + \bar{M}_{m3} + \overline{EG}_3 \wedge (\bar{F}_{i3} + \bar{P}_3)\}_{123d} + \left\{ \overline{EH}_1 \wedge \frac{\bar{F}_{43}}{2} + \overline{EH}_2 \wedge \frac{\bar{F}_{43}}{2} \right\}_{123e} = \bar{0}$$

2. Segundo Conjunto

Para este conjunto, se resuelven las fuerzas de enlace y momentos presentes de manera global, sin seguir un orden de sólidos. Esto es así debido a la interrelación de las Fuerzas de Enlace de todos los sólidos, que impide una resolución paso a paso. Se indican a continuación todas las acciones que intervienen en los sólidos, así como sus fuerzas de enlace.

Sólido 1

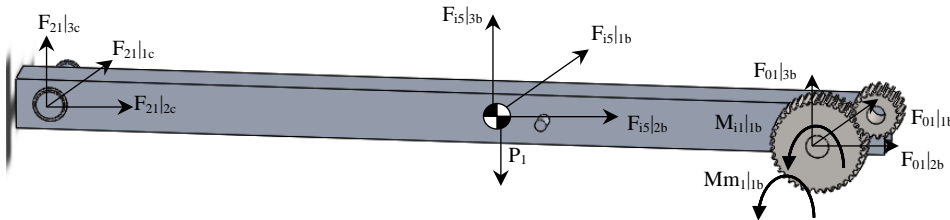


Figura 61. Sólido 1. Fuerzas y Momentos

$$\sum \bar{F} = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{F}_{21}\}_{123c} + \{\bar{F}_{01} + \bar{F}_{i1}\}_{123b} + \{\bar{P}_1\}_{123a} = \bar{0}$$

$$\sum \bar{M}(A) = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{M}_{i1} + \bar{M}_{m1} + \overline{BG}_1 \wedge (\bar{F}_{i1} + \bar{P}_1) + \overline{BC} \wedge \bar{F}_{21}\}_{123a} = \bar{0}$$

Sólido 2

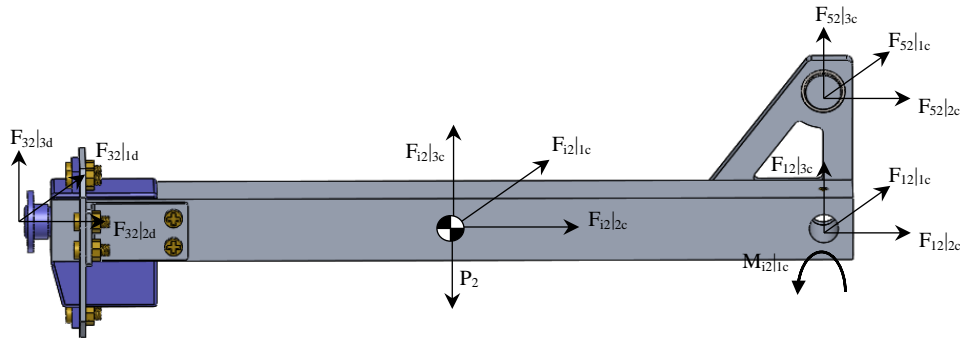


Figura 62. Sólido 2. Fuerzas y Momentos

$$\sum \bar{F} = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{F}_{32}\}_{123d} + \{\bar{F}_{12} + \bar{F}_{52} + \bar{F}_{i2}\}_{123c} + \{\bar{P}_2\}_{123a} = \bar{0}$$

$$\sum \bar{M}(D) = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{M}_{i2} + \overline{DG}_2 \wedge (\bar{F}_{i2} + \bar{P}_2) + \overline{DI} \wedge \bar{F}_{52}\}_{123c} = \bar{0}$$

Sólido 5

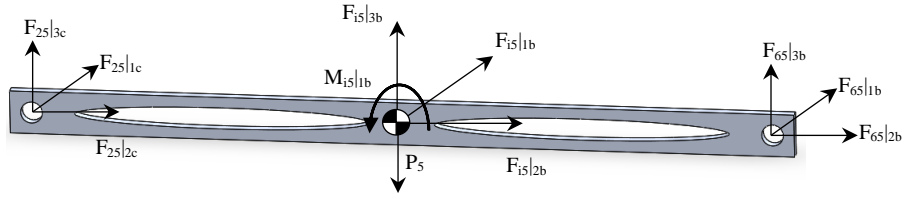


Figura 63. Sólido 5. Fuerzas y Momentos

$$\sum \bar{F} = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{F}_{25}\}_{123c} + \{\bar{F}_{65} + \bar{F}_{15}\}_{123b} + \{\bar{P}_5\}_{123a} = \bar{0}$$

$$\sum \bar{M}(A) = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{M}_{15} + \bar{J}\bar{G}_5 \wedge (\bar{F}_{15} + \bar{P}_5) + \bar{J}\bar{I} \wedge \bar{F}_{25}\}_{123b} = \bar{0}$$

Sólido 6

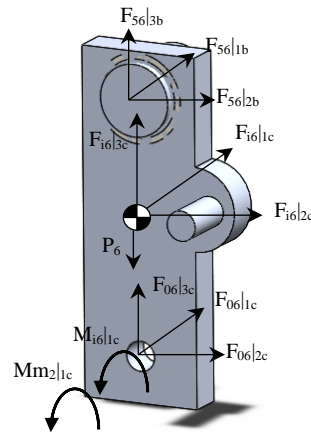


Figura 64. Sólido 6. Fuerzas y Momentos

$$\sum \bar{F} = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{F}_{56} + \bar{F}_{06} + \bar{F}_{16}\}_{123b} + \{\bar{P}_6\}_{123a} = \bar{0}$$

$$\sum \bar{M}(A) = \bar{0} \Rightarrow \{\bar{M}_{16} + \bar{M}_{m2} + \bar{A}\bar{G}_6 \wedge (\bar{F}_{16} + \bar{P}_6) + \bar{A}\bar{J} \wedge \bar{F}_{56}\}_{123a} = \bar{0}$$

3. Tercer Conjunto

Este conjunto se resuelve mediante equilibrio de fuerzas y momentos en los tres ejes coordenados. Se exponen a continuación las fuerzas y momentos que intervienen en los sólidos del conjunto.

Sólido 0

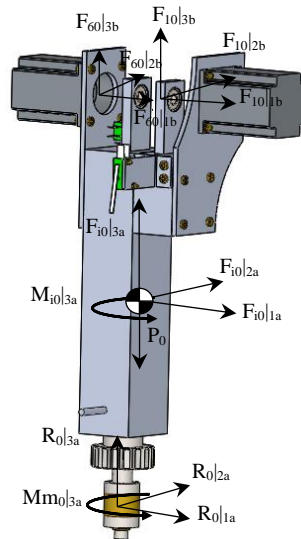


Figura 65. Sólido 0. Fuerzas y Momentos

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \{\vec{F}_{10} + \vec{F}_{60}\}_{123b} + \{\vec{F}_{i0} + \vec{P}_0 + \vec{R}_0\}_{123a} = \vec{0}$$

$$\sum \vec{M}(A) = \vec{0} \Rightarrow \{\vec{M}_{i0} + \vec{M}_{m0} + \overline{OG}_0 \wedge (\vec{F}_{i0} + \vec{P}_0) + \overline{OB} \wedge \vec{F}_{10} + \overline{OA} \wedge \vec{F}_{60}\}_{123a} = \vec{0}$$

4.3 MATLAB

Uno de los múltiples usos de la herramienta *Matlab* es la realización de operaciones mediante objetos simbólicos (en oposición a los cálculos numéricos que realizan la mayoría de los programas). Se ha optado por utilizar dicha resolución en ese análisis para evitar una posible pérdida de precisión debido a las aproximaciones numéricas en los cálculos.

Para la resolución de cada apartado, se ha creado un fichero o *script*, que contiene las ecuaciones de todas las variables implicadas en el mismo. Asimismo, ha sido necesaria la implementación de funciones auxiliares que permitieran la resolución final y presentación de resultados. A continuación, se detallan los ficheros utilizados durante el proceso.

1. Análisis Cinemático

En primer lugar, como se indica en la *Sección 8*, se ha realizado un análisis cinemático del mecanismo. Para ello, se han formulado las ecuaciones de velocidades y aceleraciones pertinentes, tanto de los puntos extremos de las barras como de sus centros de gravedad, expuestas en el siguiente fichero de texto.

Se han implementado matrices de cambio de base (matrices de rotación), para expresar las variables tanto en la Base Global como en las bases de cada Sólido.

```
% Modelo Directo Cinemático mediante Matrices de paso

%Análisis Cinemático
clear all;

%Matrices de cambio de base
syms psi phi tita eta xi;
L01 = [cos(psi) -sin(psi) 0; sin(psi) cos(psi) 0; 0 0 1]; %XYZ
==>123a
L12 = [1 0 0; 0 cos(phi) -sin(phi); 0 sin(phi) cos(phi)];
%123a==>123b
L23 = [1 0 0; 0 cos(tita) -sin(tita); 0 sin(tita) cos(tita)];
%123b==>123c
L34 = [cos(eta) 0 sin(eta); 0 1 0; -sin(eta) 0 cos(eta)];
%123c==>123d
L45 = [cos(xi) -sin(xi) 0; sin(xi) cos(xi) 0; 0 0 1]; %123d==>123e

%Velocidades Angulares en Locales
syms psi_d phi_d tita_d eta_d xi_d;
W0a = [0; 0; -psi_d]; %123a
W1a = [-phi_d; 0; 0]; %123a
W2a = [tita_d; 0; 0]; %123a
W3c = [0; eta_d; 0]; %123c
W4d = [0; 0; xi_d]; %123d

%Velocidades Angulares en Globales (123a)
W0 = L01*W0a;
W1 = W1a+W0;
W2 = W2a+W1;
W3 = L12\ (L23\W3c)+W2;
W3 = simplify(W3);
W4 = L12\ (L23\ (L34\W4d))+W3;
W4 = simplify(W4);

%Aceleraciones Angulares en Locales
syms psi_dd phi_dd tita_dd eta_dd xi_dd;
E0a = [0; 0; -psi_dd]; %123a
E1a = [-phi_dd; 0; 0]; %123a
E2a = [tita_dd; 0; 0]; %123a
E3c = [0; eta_dd; 0]; %123c
E4d = [0; 0; xi_dd]; %123d
```

```

    %Aceleraciones Angulares en Globales
syms psi_dd phi_dd tita_dd eta_dd xi_dd;
E0 = diff(W0,psi_d,1)*psi_dd+diff(W0,phi_d,1)*phi_dd+diff(W0,tita_d,1)*tita_dd+diff(W0,eta_d,1)*eta_dd+diff(W0,xi_d,1)*xi_dd;
E0 = simplify(E0);
E1 = diff(W1,psi_d,1)*psi_dd+diff(W1,phi_d,1)*phi_dd+diff(W1,tita_d,1)*tita_dd+diff(W1,eta_d,1)*eta_dd+diff(W1,xi_d,1)*xi_dd;
E1 = simplify(E1);
E2 = diff(W2,psi_d,1)*psi_dd+diff(W2,phi_d,1)*phi_dd+diff(W2,tita_d,1)*tita_dd+diff(W2,eta_d,1)*eta_dd+diff(W2,xi_d,1)*xi_dd;
E2 = simplify(E2);
E3 = diff(W3,psi_d,1)*psi_dd+diff(W3,phi_d,1)*phi_dd+diff(W3,tita_d,1)*tita_dd+diff(W3,eta_d,1)*eta_dd+diff(W3,xi_d,1)*xi_dd;
E3 = simplify(E3);
E4 = diff(W4,psi_d,1)*psi_dd+diff(W4,phi_d,1)*phi_dd+diff(W4,tita_d,1)*tita_dd+diff(W4,eta_d,1)*eta_dd+diff(W4,xi_d,1)*xi_dd;
E4 = simplify(E4);

```

```

    %Distancias en su base correspondiente

```

```

syms a b c e f h kx kz;
OA = [0; 0; a]; %BASE 123a
AB = [b; 0; 0]; %BASE 123a
BCb = [0;-c; 0]; %BASE 123b
CDb = [-b;0; 0]; %BASE 123b
DEc = [0;-e; 0]; %BASE 123c
EFc = [0;-f; 0]; %BASE 123c
FH1d = [0; 0; h]; %BASE 123d
FH2d = [0; 0;-h]; %BASE 123d
H2H1d = -FH2d+FH1d; %BASE 123d
DIc = [-kx; 0; kz]; %BASE 123c
IJb = [0; c; 0]; %BASE 123b
AJc = [-kx; 0; kz]; %BASE 123c

```

```

    %Paso de distancias a la base Global 123a
BC = L12\BCb; BC = simplify(BC);
CD = L12\CDb; CD = simplify(CD);
DE = L12\ (L23\DEc); DE = simplify(DE);
EF = L12\ (L23\EFc); EF = simplify(EF);
FH1 = L12\ (L23\ (L34\FH1d)); FH1 = simplify(FH1);
FH2 = L12\ (L23\ (L34\FH2d)); FH2 = simplify(FH2);
H2H1 = L12\ (L23\ (L34\H2H1d)); H2H1 = simplify(H2H1);
DI = L12\ (L23\DIc); DI = simplify(DI);
IJ = L12\IJb; IJ = simplify(IJ);
AJ = L12\ (L23\AJc); AJ = simplify(AJ);

```

```

    %Condición de enlace

```

```

V_0 = sym(' [0;0;0] ');
a_0 = sym(' [0;0;0] ');

```

```

    %Ecuaciones Cinemáticas Velocidades en Globales
V_A = V_O+cross(W0,OA);
V_B = V_A+cross(W0,AB);
V_C = V_B+cross(W1,BC);
V_D = V_C+cross(W1,CD);
V_E = V_D+cross(W2,DE);
V_F = V_E+cross(W3,EF);
V_I = V_D+cross(W2,DI);
V_J = V_A+cross(W2,AJ);

    %Ecuaciones Cinemáticas Aceleraciones en Globales
a_A = a_O+cross(E0,OA)+cross(W0,cross(W0,OA));
a_B = a_A+cross(E0,AB)+cross(W0,cross(W0,AB));
a_C = a_B+cross(E1,BC)+cross(W1,cross(W1,BC));
a_D = a_C+cross(E1,CD)+cross(W1,cross(W1,CD));
a_E = a_D+cross(E2,DE)+cross(W2,cross(W2,DE));
a_F = a_E+cross(E3,EF)+cross(W3,cross(W3,EF));
a_I = a_D+cross(E2,DI)+cross(W2,cross(W2,DI));
a_J = a_A+cross(E2,AJ)+cross(W2,cross(W2,AJ));

    %Cinemática de los Centros de Gravedad de cada barra

    %Distancias
OG0a = [0.01951; 7.39e-3; 0.31032];           %BASE 123a
BG1b = [0.0199; -0.06737; 2.21e-3];         %BASE 123b
DG2c = [-3.21e-3; -0.1362; 2.05e-3];       %BASE 123c
EG3d = [0; -0.03138; -7.44e-3];           %BASE 123d
H2G4d = [0; 0; 5.58e-3];                   %BASE 123d
JG5b = [0; -0.171; 0];                     %BASE 123b
AG6b = [-0.01229; 7e-4; 0.01369];         %BASE 123b

    %Paso de distancias a la base Global 123a
OG0 = OG0a;
BG1 = L12\BG1b;                             BG1 = simplify(BG1);
DG2 = L12\ (L23\DG2c);                       DG2 = simplify(DG2);
EG3 = L12\ (L23\ (L34\EG3d));                 EG3 = simplify(EG3);
H2G4 = L12\ (L23\ (L34\H2G4d));               H2G4 = simplify(H2G4);
JG5 = L12\JG5b;                               JG5 = simplify(JG5);
AG6 = L12\AG6b;                               AG6 = simplify(AG6);

    %Velocidades en globales 123a
V_G0 = V_O+cross(W0,OG0);
V_G1 = V_B+cross(W1,BG1);
V_G2 = V_D+cross(W2,DG2);
V_G3 = V_E+cross(W3,EG3);
V_G4 = V_F;
V_G5 = V_J+cross(W1,JG5);
V_G6 = V_A+cross(W2,AG6);

    %Aceleraciones en globales 123a
a_G0 = a_O+cross(E0,OG0)+cross(W0,cross(W0,OG0));
a_G1 = a_B+cross(E1,BG1)+cross(W1,cross(W1,BG1));
a_G2 = a_D+cross(E2,DG2)+cross(W2,cross(W2,DG2));
a_G3 = a_E+cross(E3,EG3)+cross(W3,cross(W3,EG3));

```

```

a_G4 = a_F;
a_G5 = a_J+cross(E1,JG5)+cross(W1,cross(W1,JG5));
a_G6 = a_A+cross(E2,AG6)+cross(W2,cross(W2,AG6));
    %Aceleraciones en locales
a_G0a = a_G0;
a_G1b = L12*a_G1;
a_G2c = L23*(L12*a_G2);
a_G3d = L34*(L23*(L12*a_G3));
a_G4e = L45*(L34*(L23*(L12*a_G4)));
a_G5b = L12*a_G5;
a_G6c = L23*(L12*a_G6);

```

2. Análisis Dinámico

Tras obtener las expresiones cinemáticas de todos los puntos relevantes del mecanismo, se procede a realizar el cálculo dinámico, con el objetivo de obtener los Pares Motores de cada Eje, y compararlos con los obtenidos en las simulaciones en *Pro-Engineer*.

El fichero implementado para ello se divide en tres partes, tal y como se indica en la *Sección 8*. Tras definir los valores de inercia y peso de cada barra, se aplican las ecuaciones de Newton para la resolución de las diferentes incógnitas. A continuación, se muestra el fichero realizado.

```

% Análisis de los pares motores mediante Newton

    %Fuerzas y Momentos de inercia de las barras [kg,N,m^2]

    %Fuerzas en globales (I23a)y locales, y Momentos en locales de cada
barra

Ib0 = 0.02523;          Mi0 = Ib0*E0a;
Ib1 = 0.00733;          Mi1 = Ib1*E1a;
Ib2 = 0.00545;          Mi2 = Ib2*E2a;
Ib3 = 0.06e-3;          Mi3 = Ib3*E3c;
Ib4 = 0.01e-3;          Mi4 = Ib4*E4d;
Ib5 = 3.2e-6;           Mi5 = Ib5*E2a;
Ib6 = 29.8e-6;          Mi6 = Ib6*E2a;

m0 = 4.159;             Fi0 = m0*a_G0;          Fi0a = m0*a_G0a;
m1 = 0.359;             Fi1 = m1*a_G1;          Fi1b = m1*a_G1b;
m2 = 0.181;             Fi2 = m2*a_G2;          Fi2c = m2*a_G2c;
m3 = 0.038;             Fi3 = m3*a_G3;          Fi3d = m3*a_G3d;
m4 = 0.0325;            Fi4 = m4*a_G4;          Fi4e = m4*a_G4e;
m5 = 0.0668;            Fi5 = m5*a_G5;          Fi5b = m5*a_G5b;
m6 = 0.0495;            Fi6 = m6*a_G6;          Fi6c = m6*a_G6c;
grav = [0; 0; -9.8];

```

```

%Resolución mediante equilibrios de Fuerzas y Momentos

```

```

    %PARTE 1. MUÑECA Y PALA

```

```

%Sólido 4
F34 = -(Fi4+m4*grav);
Aux = cross(H2G4,Fi4)+cross(H2H1,F34/2);
Aux = L34*(L23*(L12*Aux));
Mm4 = -(Mi4+Aux);

%Coordenadas Globales
%CG
%Coordenadas Barra 4
%CB4

```

```

%Sólido 3
F43 = -F34; %CG
F23 = -(F43+Fi3+m3*grav); %CG
EH1 = EF+FH1; %CG
EH2 = EF+FH2; %CG
Aux =
cross (EH1, F43/2)+cross (EH2, F43/2)+cross (EG3, Fi3)+cross (EG3, m3*grav);
%CG
Aux = L23*(L12*Aux); %CB3
Mm3 = -(Mi3+Aux); %CB3

%PARTE 2. CUADRILATERO Y BRAZO 3

%1. Sumatorio de Momentos en D2 (Sólido 2)
F32 = -F23; %CG
F32c = L12*F32; %CB2
P2c = L23*(L12*m2*grav); %CB2
F52x = -1/DIc(3)*(DEc(2)*F32c(3)+DG2c(2)*(Fi2c(3)+P2c(3))+Mi2(1));
%CB2

%2. Sumatorio de Fuerzas en x (2) (Sólido 2)
F12x = -(F32(2)+Fi2c(2)+P2c(2)+F52x); %CB2

%3. Sumatorio de Momentos en I (Sólido 5)
F65y = -1/IJ(2)*(-JG5b(2)*(Fi5b(3)+P2c(3))-Mi5(1)); %CB2

%4. Sumatorio de Fuerzas en y (3) (Sólido 5)
P5b = L12*(m5*grav); %CB5
F25y = -(F65y+(Fi5b(3)+P5b(3))); %CB5

%5. Cambio de Base entre 2 y 5
F25x = 1/cos(tita)*(F52x+F25y*sin(tita)); %CB5
F52y = F25x*sin(tita)+F25y*cos(tita); %CB2

%6. Sumatorio de Fuerzas en y (3) (Sólido 2)
F12y = -(F32(3)+F52y+Fi2c(3)+P2c(3)); %CB2

%7. Sumatorio de Fuerzas en x (2) (Sólido 5)
F65x = -(F25x+Fi5b(2)+P5b(2)); %CB5

%8. Relación de Bases entre 1 y 2
F21x = F12x*cos(tita)+F12y*sin(tita); %CB1
F21y = -F12x*sin(tita)+F12y*cos(tita); %CB1

%9. Sumatorio de Fuerzas en x (2) (Sólido 1)
P1b = L12*(m1*grav); %CB1
F01x = -(Fi1b(2)+P1b(2)+F21x); %CB1

%10. Sumatorio de Fuerzas en y (3) (Sólido 1)
F01y = -(F21y+Fi1b(3)+P1b(3)); %CB1

%11. Sumatorio de Momentos en B (Sólido 1)
Mm1 = Bcb(2)*F21y+BG1b(2)*(Fi1b(3)+P1b(3)); %CB1
Mm1 = simplify(Mm1);

```

```

%12. Relación de Bases entre 5 y 6
F56x = F65x*cos(tita)-F65y*sin(tita);           %CB6
F56y = F65x*sin(tita)+F65y*cos(tita);           %CB6

%13. Sumatorio de Fuerzas en x (2) (Sólido 6)
P6c = L23*(L12*m6*grav);                           %CB6
F06x = -(F56x+Fi6c(2)+P6c(2));                     %CB6

%14. Sumatorio de Fuerzas en y (3) (Sólido 6)
F06y = -(F56y+Fi6c(3)+P6c(3));                     %CB6

%15. Sumatorio de Momentos en A (Sólido 6)
Mm2 = AJc(3)*F56x-Mi6(1)+AG6b(3)*(Fi6(2)+P6c(2));
Mm2 = simplify(Mm2);

```

```

%PARTE TRES. BASE

```

```

% Sumatorio de Momentos en O (Sólido 0)

```

```

OG4 = OA+AB+BC+CD+DE+EF;                           %BG
OG3 = OA+AB+BC+CD+DE+EG3;                           %BG
OG2 = OA+AB+BC+CD+DG2;                               %BG
OG1 = OA+AB+BG1;                                     %BG
OG5 = OA+AJ+JG5;                                     %BG
OG6 = OA+AG6;                                         %BG

Mm0 = -
(Mi0(3)+Fi4(1)*OG4(2)+Fi3(1)*OG3(2)+Fi2(1)*OG2(2)+Fi5(1)*OG5(2)+Fi1(1)
*OG1(2)+Fi6(1)*OG6(2));
Mm0 = simplify(Mm0);

```

3. Cálculo numérico y representación gráfica

Por último, se sustituyen los datos numéricos de distancias, posiciones, velocidades y aceleraciones angulares en las expresiones de Pares Motores obtenidos. Se realiza una representación gráfica para facilitar el análisis.

Para este apartado, se emplean tres funciones auxiliares dentro del script implementado. La primera de ellas, la función *Sust*, sustituye los parámetros simbólicos de distancias, ángulos, velocidades y aceleraciones angulares en las expresiones de los Pares Motores. La segunda, la función *PVAVectors*, obtiene los valores de posición, velocidad y aceleración angular similares a los introducidos en *Pro-Engineer* (curva de velocidad con tramo de aceleración, velocidad constante y deceleración), que se utilizan para realizar los cálculos de Pares Motores. La tercera función, *DrawTorsor*, realiza la representación gráfica de los valores de Par Motor obtenidos, para cada eje. En las siguientes páginas, se muestran los ficheros utilizados.

Fichero principal

```
%Sustitución de Parámetros
%Matriz de Parámetros [distancias (m), velocidades(deg/s),
aceleraciones(deg/s2), ángulos(deg)]
A = [0.37819 0.0245 0.3425 0.270 0.06792 0.055 0.014 0.042505;...
     720 720 720 720 720 0 0 0;...
     1800 1800 1800 1800 1800 0 0 0;...
     90 0 0 90 90 0 0 0];

%Sustitución de parámetros en Expresiones
Mm0 = Sust(Mm0,A,'psi ');
Mm0 = simplify(Mm0);
Mm1 = Sust(Mm1,A,'phi ');
Mm1 = simplify(Mm1);
Mm2 = Sust(Mm2,A,'tita');
Mm2 = simplify(Mm2);
Mm3 = Sust(Mm3,A,'eta ');
Mm3 = simplify(Mm3);
Mm4 = Sust(Mm4,A,'xi ');
Mm4 = subs(Mm4,'psi_dd',0);
Mm4 = simplify(Mm4);

%Cálculo de Momentos en función del ángulo de giro
[ Pos,Vel,Acel,Time ] = PVAVectors(720, 1800, 0.4);
Mom0 = zeros(180,1); %Vector valores de
Momentos en locales
Mom1 = zeros(180,1);
Mom2 = zeros(180,1);
Mom3 = zeros(180,1);
Mom4 = zeros(180,1);

for i=1:180 %Sustitución de ángulos, velocidades y
aceleraciones
    Aux0 = subs(Mm0,'psi',Pos(i));
    Aux0 = subs(Aux0,'psi_d',Vel(i));
    Aux0 = subs(Aux0,'psi_dd',Acel(i));
    Mom0(i) = Aux0;
    Aux1 = subs(Mm1,'phi',Pos(i));
    Aux1 = subs(Aux1,'phi_d',Vel(i));
    Aux1 = subs(Aux1,'phi_dd',Acel(i));
    Mom1(i) = Aux1;
    Aux2 = subs(Mm2,'tita',Pos(i));
    Aux2 = subs(Aux2,'tita_d',Vel(i));
    Aux2 = subs(Aux2,'tita_dd',Acel(i));
    Mom2(i) = Aux2;
    Aux3 = subs(Mm3(2),'eta',Pos(i));
    Aux3 = subs(Aux3,'eta_d',Vel(i));
    Aux3 = subs(Aux3,'eta_dd',Acel(i));
    Mom3(i) = Aux3;
    Aux4 = subs(Mm4(3),'xi',Pos(i));
    Aux4 = subs(Aux4,'xi_d',Vel(i));
    Aux4 = subs(Aux4,'xi_dd',Acel(i));
    Mom4(i) = Aux4;
end

%Representación Gráfica

DrawTorsor( Mom0,Mom1,Mom2,Mom3,Mom4,Time );
```

Función Sust

```
% Sustitución de parámetros geométricos y cinemáticos en una expresión
% M expresión a obtener
% A matriz de parámetros geométricos, de velocidades y aceleraciones
(3x10)
%Primera fila ==> Parámetros geométricos
%Segunda fila ==> Parámetros de velocidad angular
%Tercera fila ==> Parámetros de aceleración angular
%Cuarta fila ==> Parámetros posición angular
```

```
function [M] = Sust(Mint,A,angl)
```

```
Maux = Mint;
Maux = subs(Maux, 'a', A(1,1));
Maux = subs(Maux, 'b', A(1,2));
Maux = subs(Maux, 'c', A(1,3));
Maux = subs(Maux, 'e', A(1,4));
Maux = subs(Maux, 'f', A(1,5));
Maux = subs(Maux, 'h', A(1,6));
Maux = subs(Maux, 'kx', A(1,7));
Maux = subs(Maux, 'kz', A(1,8));

rad = pi/180; %Paso de Grados a Radianes
% Maux = subs(Maux, 'psi_d', A(2,1)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'psi_dd', A(3,1)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'phi_d', A(2,2)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'phi_dd', A(3,2)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'tita_d', A(2,3)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'tita_dd', A(3,3)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'eta_d', A(2,4)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'eta_dd', A(3,4)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'xi_d', A(2,5)*rad);
% Maux = subs(Maux, 'xi_dd', A(3,5)*rad);

if angl == 'psi '
    Maux = subs(Maux, 'phi', A(4,2)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'tita', A(4,3)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'eta', A(4,4)*rad);
%     Maux = subs(Maux, 'xi', A(4,5)*rad);
%     Maux = subs(Maux, 'psi_d', A(2,1)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'phi_d', 0);
    Maux = subs(Maux, 'phi_dd', 0);
    Maux = subs(Maux, 'tita_d', 0);
    Maux = subs(Maux, 'tita_dd', 0);
    Maux = subs(Maux, 'eta_d', 0);
    Maux = subs(Maux, 'eta_dd', 0);
    Maux = subs(Maux, 'xi_d', 0);
    Maux = subs(Maux, 'xi_dd', 0);

elseif angl == 'phi '
%     Maux = subs(Maux, 'psi', A(4,1)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'tita', A(4,3)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'eta', A(4,4)*rad);
%     Maux = subs(Maux, 'xi', A(4,5)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'psi_d', 0);
    Maux = subs(Maux, 'psi_dd', 0);
%     Maux = subs(Maux, 'phi_d', A(2,2)*rad);
    Maux = subs(Maux, 'tita_d', 0);
```



```

    Maux = subs (Maux, 'tita_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'eta_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'eta_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'xi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'xi_dd', 0);
elseif angl == 'tita'
%   Maux = subs (Maux, 'psi', A(4,1)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'phi', A(4,2)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'eta', A(4,4)*rad);
%   Maux = subs (Maux, 'xi', A(4,5)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'psi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'psi_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'phi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'phi_dd', 0);
%   Maux = subs (Maux, 'tita_d', A(2,3)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'eta_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'eta_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'xi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'xi_dd', 0);
elseif angl == 'eta'
%   Maux = subs (Maux, 'psi', A(4,1)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'phi', A(4,2)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'tita', A(4,3)*rad);
%   Maux = subs (Maux, 'xi', A(4,5)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'psi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'psi_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'phi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'phi_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'tita_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'tita_dd', 0);
%   Maux = subs (Maux, 'eta_d', A(2,4)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'xi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'xi_dd', 0);
elseif angl == 'xi'
%   Maux = subs (Maux, 'psi', A(4,1)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'phi', A(4,2)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'tita', A(4,3)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'eta', A(4,4)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'psi_d', A(2,1)*rad);
    Maux = subs (Maux, 'psi_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'phi_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'phi_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'tita_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'tita_dd', 0);
    Maux = subs (Maux, 'eta_d', 0);
    Maux = subs (Maux, 'eta_dd', 0);
%   Maux = subs (Maux, 'xi_d', A(2,5)*rad);
else
end

M = Maux;

end

```

Función PVAVectors

`% Cálculo de los vectores posición, velocidad y aceleración`

```
function [ Pos, Vel, Acel, Time ] = PVAVectors(V, Ac, T)

tup = V/Ac;
tconst = T;
tdwn = tup;
Ttotal = tup+tconst+tdwn;
paso = Ttotal/180;
i=1;

for t=0:paso:tup
    Pos(i) = 0+0*t+(Ac*t^2)/2;
    Vel(i) = Ac*t;
    Acel(i) = Ac;
    Time(i) = t;
    i=i+1;
end
PosIn = Pos(i-1);
for t=tup:paso:tup+tconst
    Pos(i) = PosIn+V*(t-tup);
    Vel(i) = V;
    Acel(i) = 0;
    Time(i) = t;
    i=i+1;
end
PosIn = Pos(i-1);
for t=tup+tconst:paso:Ttotal
    Pos(i) = PosIn+V*(t-tup-tconst)-(Ac*(t-tup-tconst)^2)/2;
    Vel(i) = V-Ac*(t-tup-tconst);
    Acel(i) = -Ac;
    Time(i) = t;
    i=i+1;
end

Pos = Pos*pi/180;
Vel = Vel*pi/180;
Acel = Acel*pi/180;

Pos(181:183)=[];
Vel(181:183)=[];
Acel(181:183)=[];
Time(181:183)=[];
end
```

Función DrawTorsor

%Representación gráfica de Momentos Torsores respecto al tiempo

```
function [ ] = DrawTorsor( Mom0,Mom1,Mom2,Mom3,Mom4,X )
```

%Representación Gráfica

```
figure(1);  
subplot(2,3,1);  
plot(X,Mom0(:)*1000);  
title('Momento Articulación 1');  
xlabel('tiempo(s)');  
ylabel('Nmm');  
subplot(2,3,2);  
plot(X,Mom1(:)*1000);  
title('Momento Articulación 2');  
xlabel('tiempo(s)');  
ylabel('Nmm');  
subplot(2,3,3);  
plot(X,Mom2(:)*1000);  
title('Momento Articulación 3');  
xlabel('tiempo(s)');  
ylabel('Nmm');  
subplot(2,3,4);  
plot(X,Mom3(:)*1000);  
title('Momento Articulación 4');  
xlabel('tiempo(s)');  
ylabel('Nmm');  
subplot(2,3,5);  
plot(X,Mom4(:)*1000);  
title('Momento Articulación 5');  
xlabel('tiempo(s)');  
ylabel('Nmm');  
  
end
```

ANEXO 5. CONTROL DE LOS MOTORES

En el siguiente Anexo, se explican los diferentes bloques que componen el programa de control de los cinco motores del mecanismo. Además, se muestra el código realizado en lenguaje Arduino. También se incluye el montaje Hardware necesario para la implementación de dicho control.

5.1 ALGORITMO DE CONTROL

Como se ha explicado en la *Sección 10*, los Servomotores se controlan mediante una librería ya desarrollada por la Comunidad de Arduino. Sin embargo, para el control de los Stepper, es necesario realizar un desarrollo propio. Esto es así debido a la necesidad de un movimiento simultaneo de los tres motores, que no se puede conseguir mediante las librerías implementadas para ello.

Se presenta ahora, en la *Figura 66*, el esquema completo del Algoritmo de Control. Posteriormente, se explican las órdenes correspondientes a cada bloque.

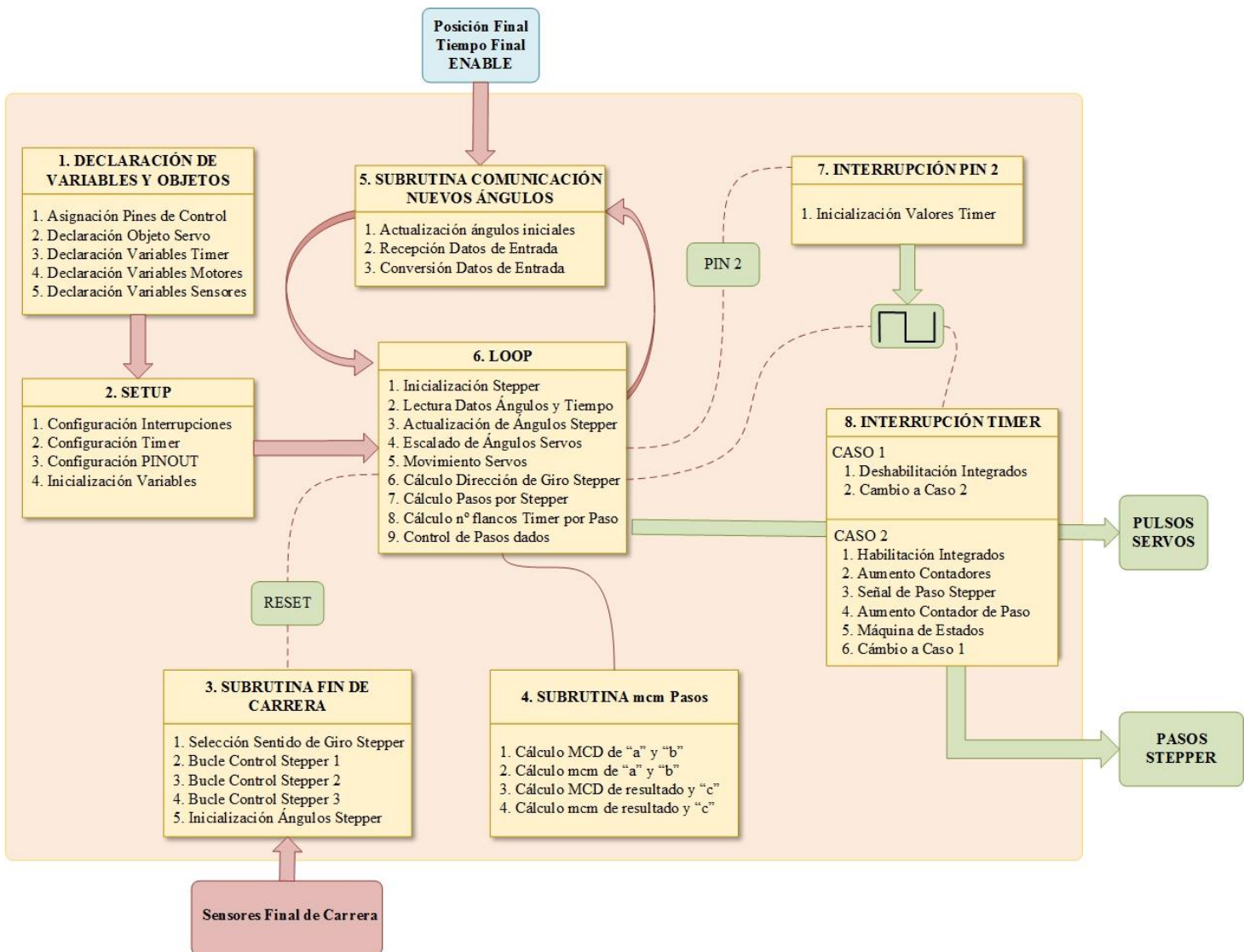


Figura 66. Software de control. Diagrama de Bloques

1. Declaración de variables y objetos

En este primer bloque se definen todas las variables globales necesarias para el desarrollo posterior del programa. También se importan las librerías necesarias para el control de los Servos, y se concretan los pines de control de cada elemento. Las partes que lo componen son las siguientes:

- 1.1. *Asignación de Pines de Control:* Con ayuda del diagrama PINOUT expuesto anteriormente, se seleccionan los puertos del Arduino operativos para cada elemento. Así, se utilizará el Puerto F para el control de la Dirección de los Stepper, su habilitación y los sensores de final de carrera; el Puerto K para el control de los Pasos de cada Stepper; y el Puerto H para el control PWM de los Servos.
- 1.2. *Declaración del Objeto Servo:* Se declaran dos objetos, Servo4 y Servo5, para cada uno de los Servomotores presentes en el Brazo Robótico. Se controlarán mediante la librería *Servo.h*.
- 1.3. *Declaración de Variables del Timer:* Se utilizará el Timer en modo Comparación, por lo que se declara tanto el tiempo de ciclo del Timer como el valor máximo de conteo. También se declara la variable booleana RISE para diferenciar entre el CASO 1 y el CASO 2 en la Interrupción 2 (7. Interrupción Timer).
- 1.4. *Declaración de Variables de los Motores:* Para cada Stepper, se declara la posición inicial y final, el ángulo a girar, el paso mínimo y pasos de cada motor y el número de flancos por paso. Se declaran además dos señales de tipo Byte, para controlar los drivers de los Stepper, una para la dirección y otra para los Pasos.
- 1.5. *Declaración de Variables de los Sensores:* Se declaran cuatro variables, tres para los sensores de final de carrera y un Reset.

2. Setup

En esta parte se realiza la configuración de diversos elementos del programa, así como la inicialización de algunas Variables del mismo.

- 2.1. *Configuración de las Interrupciones:* Se configura la Interrupción 1 para que se active con la aparición de un flanco de subida en el PIN 2 (interrupción externa), y la Interrupción 2 para que se active con el Overflow del Timer (interrupción interna).
- 2.2. *Configuración del Timer:* Se utilizará el Timer 3 del Arduino, de 16 bits. Se configura en modo comparación sin preescaler.
- 2.3. *Configuración PINOUT:* Se configuran todos los pines de control de los Stepper como salidas, y los pines de recepción de señales de los sensores como entradas. Se asignan además los pines de control de los Servos, declarados previamente.
- 2.4. *Inicialización de Variables:* Se inicializan a cero los valores de las posiciones iniciales de los motores, que se corregirán posteriormente con la Subrutina de Final de Carrera.

3. Subrutina final de carrera

Esta Subrutina es necesaria para conocer con exactitud la posición de los Stepper antes de iniciar el modo normal de funcionamiento del Brazo Robótico, ya que dichos motores no tienen un control en bucle cerrado incorporado. Dicha subrutina se activa con la señal Reset, previamente definida.

- 3.1. *Selección del Sentido de Giro de los Stepper*: En primer lugar, se define el sentido de giro de cada Stepper, de manera que activen el sensor de Final de Carrera tras un número de pasos dados.
- 3.2. *Bucle de Control Stepper 1*: En este bucle de control, se mueve el motor Stepper 1 paso a paso, comprobando si se activa o no el sensor de final de carrera. De esta manera, se posiciona cada motor en un ángulo conocido.
- 3.3. *Bucle de Control Stepper 2*: Similar al Bucle anterior.
- 3.4. *Bucle de Control Stepper 3*: Similar al Bucle anterior.
- 3.5. *Inicialización de los Ángulos de los Stepper*: Finalmente, se asignan los valores de ángulos conocidos a cada Stepper.

4. Subrutina mcm

En esta Subrutina se realiza el cálculo del Mínimo Común Múltiplo de tres números, “a”, “b” y “c”, mediante el algoritmo de Euclides. Dichos números son el número de pasos que debe dar cada Stepper hasta su posición final. El resultado, dividido por los pasos de cada motor, indicará cada cuantos flancos del Timer se debe dar un paso, para que todos los Stepper terminen su movimiento a la vez.

- 4.1. *Cálculo del MCD de “a” y “b”*: En primer lugar, se calcula el Máximo Común Divisor de los dos primeros números.
- 4.2. *Cálculo del mcm de “a” y “b”*: Posteriormente, se calcula el mínimo común múltiplo de ambos, mediante la siguiente fórmula:

$$mcm = \left(\frac{a}{MCD} \right) * b$$

- 4.3. *Cálculo del MCD del resultado y “c”*: A continuación, se calcula el Máximo Común Divisor del resultado obtenido y el tercer número.
- 4.4. *Cálculo del mcm del resultado y “c”*: Por último, se calcula el mínimo común múltiplo del resultado obtenido y el mcm calculado previamente, utilizando la fórmula arriba indicada.

5. Subrutina de comunicación

Esta Subrutina permite la recepción de los datos de ángulos actualizados para cada nueva posición del elemento terminal. Se activa mediante un evento de recepción enviado por el otro microcontrolador. La relación entre ellos es de Maestro-Envío y Esclavo-Recepción.

- 5.1. *Actualización de los ángulos iniciales*: Se actualizan las posiciones iniciales de los tres Stepper a las alcanzadas en el movimiento anterior.
- 5.2. *Recepción y almacenamiento de los datos de entrada*: A través de la librería *Wire* se reciben los datos byte a byte. Tras la recepción de cada byte, este se almacena en la variable *ang*.
- 5.3. *Conversión de los datos de entrada*: Tomados cada dos bytes, siendo el primer el más significativo, se unen en una única variable, para obtener los ángulos de cada motor en micropasos.

6. Bucle principal

Este es el bloque principal del programa, que se repite continuamente para el correcto funcionamiento del Brazo Robótico. En él, se actualizan las consignas de movimiento de cada robot, y se controla el movimiento de los Servos de manera directa. Además, se da paso a las dos subrutinas anteriormente descritas, en función de las necesidades de cada momento.

- 6.1. *Inicialización Stepper*: Si se activa la señal de Reset, se realiza la Subrutina de inicialización.
- 6.2. *Actualización de Ángulos de los Stepper*: Cálculo de los ángulos entre la posición final y la inicial.
- 6.3. *Escalado de ángulos de los Servos*: Paso de los ángulos de los Servos de grados a bites. Necesario para usar la librería *Servo*.
- 6.4. *Movimiento de los Servos*: Mediante orden *Servo.write* de la librería *Servo*.
- 6.5. *Cálculo de la Dirección de Giro de los Stepper*: Asignación de la señal *SignalDir*, necesaria para los integrados de control de los Servos.
- 6.6. *Cálculo de los Pasos por Stepper*: Mediante el paso mínimo indicado en las especificaciones de los Stepper.
- 6.7. *Cálculo del número de flancos del Timer por Paso*: A través de la Subrutina *mcm* y los pasos a dar en cada Stepper.
- 6.8. *Control de los pasos dados*: Mediante el contador *pasoactual*. Cuando dicho contador llega a su límite, se desactiva el Timer de interrupción.

7. Interrupción pin 2

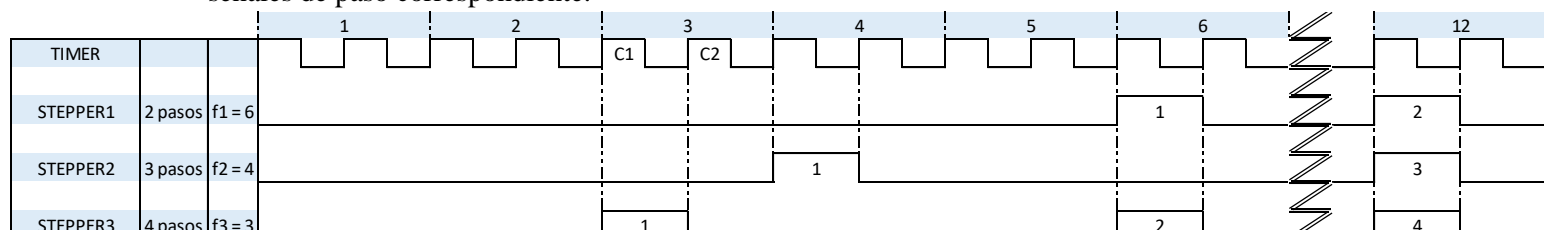
En esta interrupción, activada mediante una orden externa en el Pin 2, se configura el valor del Timer en función de la velocidad de movimiento de los Stepper necesaria para cada caso.

- 7.1. *Inicialización de los Valores del Timer*: En primer lugar se reinicia el contador de los pasos dados por los Stepper, *pasoactual*, a cero. Posteriormente se calcula el valor máximo de conteo del Timer mediante la frecuencia del mismo y la velocidad de los motores indicada anteriormente. Finalmente se habilita la interrupción activada por el *overflow* del Timer. La frecuencia de conmutación del Timer será el doble de la necesaria, pues en el primer flanco de subida se activa el Caso 1 de la Interrupción 2, y en el segundo flanco de subida se activa el Caso 2.

8. Interrupción timer

La segunda interrupción del Software se encarga de activar la señal de Paso para cada Stepper, que es recogida posteriormente por los Drivers de Control. Puesto que dicha señal debe estar activada cierto tiempo, la interrupción dispone de dos casos que se alternan cada vez que se activa. En el primer caso, se ponen a cero todas las señales de paso, mientras que en el segundo se habilitan las señales que son necesarias en ese momento. Dicha implementación es una variante del Algoritmo de Bresenhan (Kenneth I., 1999).

En el siguiente esquema se muestra una tabla de tiempos como ejemplo de funcionamiento, con tres valores aleatorios de pasos para los tres Stepper. La frecuencia del Timer es el doble de la frecuencia de paso, puesto que en cada paso se deben activar y posteriormente desactivar las señales de paso correspondiente.



A continuación, se explican los dos casos de esta interrupción, alternantes cada dos flancos del Timer.

CASO 1

- 8.1. *Deshabilitación de Integrados:* Este caso corta la señal de paso del Arduino, poniendo a cero todos los registros de control
- 8.2. *Cambio a Caso 2:* Mediante la variable booleana RISE

CASO 2

- 7.1. *Habilitación de Integrados:* se activan los bits del PORT K correspondientes al Enable de los Integrados.
- 7.2. *Aumento de Contadores de flanco:* Se aumenta el contador de número de flancos del Timer en bajo hasta flanco en alto, para cada uno de los tres Stepper.
- 7.3. *Señal de Paso de cada Stepper:* En función de los Contadores de Flancos, se asigna un 0 o un 1 a las Señales de Paso de los Stepper.
- 7.4. *Aumento de Contador Global de Pasos:* Se aumenta en uno en Contador Global de Pasos, que se utiliza en el bucle general.
- 7.5. *Máquina de Estados:* En este paso se introduce el algoritmo de variación de velocidad (Atmel Corporation, 2016) necesario para que los motores alcancen la velocidad máxima de manera gradual. En el siguiente esquema (Figura 67) se muestran los diferentes estados del mismo.

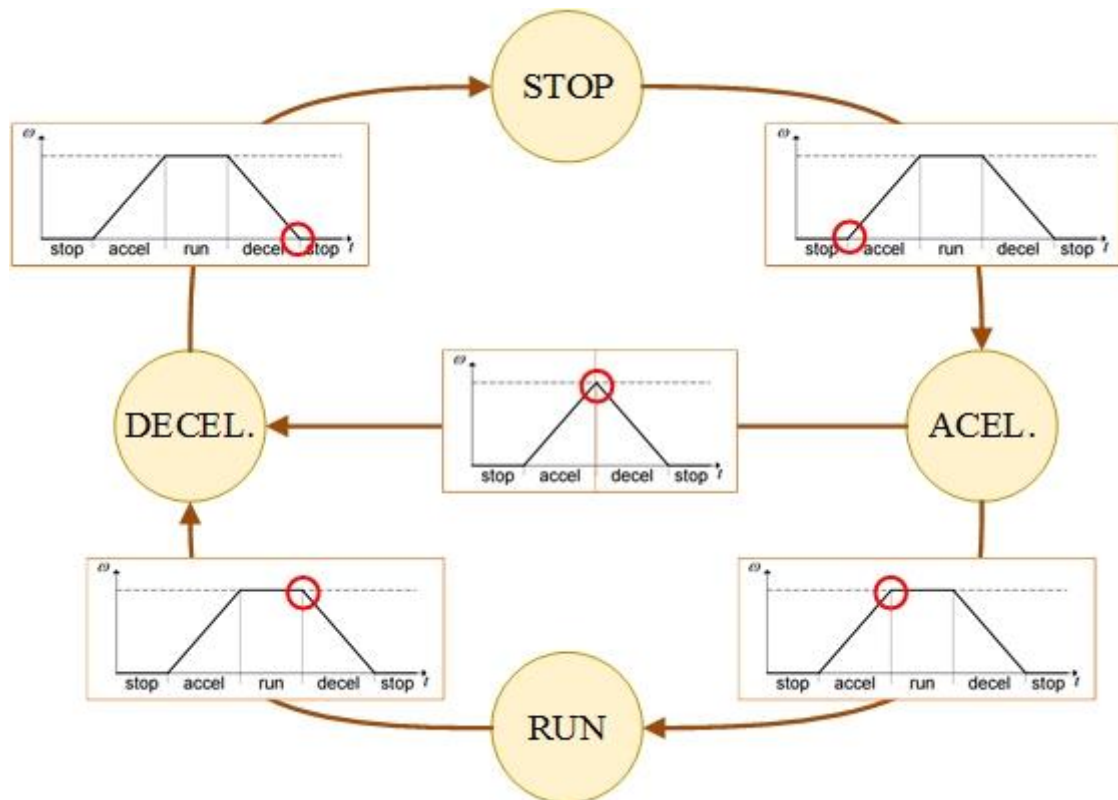


Figura 67. Máquina de Estados

- 7.6. *Cambio a Caso 1:* Mediante la variable booleana RISE

5.2 CÓDIGO EN ARDUINO

A continuación, en las siguientes páginas, se muestra el código realizado.

```
1
2 //Código para control simultaneo de 3 motores Stepper y 2 Servos.
3 //Juan Adán Laguna
4 //03-08-2016
5
6 // 1. Declaración de Variables *****
7
8 #include <Servo.h>
9 #include <Wire.h>
10
11
12 //Asignación de pines de control de los motores
13 int S1Pin1 = 89;           //Pin de Flanco de paso S1
14 int S1Pin2 = 97;           //Pin de Dirección S1
15 int S2Pin1 = 88;           //Pin de Flanco de paso S2
16 int S2Pin2 = 96;           //Pin de Dirección S2
17 int S3Pin1 = 87;           //Pin de Flanco de paso S3
18 int S3Pin2 = 95;           //Pin de Dirección S3
19 int Ser4Pin = 6;           //Pin de Ángulo Servo 4
20 int Ser5Pin = 7;           //Pin de Ángulo Servo 5
21 int EnablePin = 90;        //Pin de Habilitación de los integrados
22 int Sensor1Pin = 93;       //Pin de Sensor Fin de Carrera 1
23 int Sensor2Pin = 92;       //Pin de Sensor Fin de Carrera 2
24 int Sensor3Pin = 91;       //Pin de Sensor Fin de Carrera 3
25 int ResetPin = 94;         //Pin de Boton de Reset
26
27 //Declaración del objeto Servo
28 Servo Servo4;
29 Servo Servo5;
30
31 //Declaración de variables y constantes
32 //Variables Timer
33 float tiempo;              //Tiempo de movimiento
34 int maxTimer;              //Nº máximo de conteo Timer
35 float tTimer;              //Tiempo de ciclo de timer
36 boolean RISE = true;       //Caso inicio paso siguiente o fin paso anterior
37 int estado=0;              //Máquina de estados
38 float tace1 = 0.8;         //Tiempo de Aceleración hasta velocidad máxima
39
40 //Variables Motores
41 float pos1f,pos2f,pos3f;    //Posiciones finales Stepper dadas en centesimas de grado
42 float pos1i,pos2i,pos3i;    //Posiciones iniciales en centesimas de grado
43 byte ang[12];               //Matriz para almacenamiento de datos leídos
44 float ang1,ang2,ang3;       //Ángulo total a girar
45 int pasomax;                //Nº mayor de pasos entre S1, S2 y S3
46 int pasoactual;             //Contador con el paso actual
47 int paso1,paso2,paso3;      //Número de pasos por Stepper
48 float ang4,ang5;            //Posiciones finales Servos dadas en grados con 2 decimales
49 int f1,f2,f3;               //Nº máximo de flancos Timer por paso
50 int i1,i2,i3;               //Contadores flancos Timer
51 byte SignalPaso = B00000000; //Señal de control del paso de los Stepper
52 byte SignalDir = B00000000;  //Señal de control de la dirección de los Stepper
53
```

```

54 //Variables Control Aceleración
55 const float pi = 3.141592;
56 float pasomin=100; //Paso mínimo del Stepper en centesimas de grado
57 float Const = 0.676*(sqrt(2*pasomin/(10*pi))); //Constante de cálculo de coeficientes algoritmo de aceleración
58 float Ci, Cii; //Coeficientes algoritmo de aceleración
59 int pasoaccel = 144; //Pasos hasta velocidad máxima
60 int pasosmitad; //Pasos hasta mitad de recorrido
61 int n = 0; //Contador algoritmo de aceleración
62
63 //Variables sensores
64 boolean Sensor1, Sensor2, Sensor3; //Señales de sensores fin de carrera
65 boolean Reset; //Señal de Inicialización de Stepper
66
67 //2. SETUP *****//
68
69 void setup()
70 {
71 //Comunicacion
72 Wire.begin(1);
73 Serial.begin(9600);
74 Wire.onReceive(LecturaValores); //Se activa el void LecturaValores cuando el Master envía evento
75
76 //Interrupciones
77 attachInterrupt( 3, Interrupcion1, RISING); // Interrupción de inicialización del Timer
78 //Falta Interrupción del Timer
79
80 //Configuración del Timer 3
81 noInterrupts(); //disable all interrupts
82 TCCR3A = 0;
83 TCCR3B = 0;
84 TCNT3 = 0;
85
86 TCCR3B |= (1 << WGM12); //CTC Mode
87 TCCR3B |= (1 << CS10); //No prescaler
88 tTimer = 10; //Tiempo de ciclo del timer (ms)
89 interrupts(); //enable all interrupts
90
91 //Asignación de dirección de los pines
92 pinMode(S1Pin1, OUTPUT);
93 pinMode(S1Pin2, OUTPUT);
94 pinMode(S2Pin1, OUTPUT);
95 pinMode(S2Pin2, OUTPUT);
96 pinMode(S3Pin1, OUTPUT);
97 pinMode(S3Pin2, OUTPUT);
98 pinMode(EnablePin, OUTPUT);
99 pinMode(Sensor1Pin, INPUT);
100 pinMode(Sensor2Pin, INPUT);
101 pinMode(Sensor3Pin, INPUT);
102 pinMode(ResetPin, INPUT);
103 Servo4.attach(Ser4Pin);
104 Servo5.attach(Ser5Pin);
105
106 //Inicialización de Posiciones de los Stepper
107 pos1i = 0;
108 pos2i = 0;
109 pos3i = 0;
110
111 //Inicialización Contadores
112 i1 = 0;
113 i2 = 0;
114 i3 = 0;
115
116 }
117

```

```

118 //3. Subrutina inicialización Fin de Carrera *****
119
120 void InicializaStepper ()
121 {
122     SignalDir = B00000111;    //Selección del sentido de giro de cada Stepper
123     PORTF = B00000111 & SignalDir;
124     Sensor1 = B00010000 & PORTF;
125     Sensor2 = B00100000 & PORTF;
126     Sensor3 = B01000000 & PORTF;
127
128     while (not(Sensor1))
129     {
130         SignalPaso = B10000001;    //Señal de Paso al Stepper 1
131         PORTK = B10000001 & SignalPaso;
132         delay(500);
133         SignalPaso = B10000000;
134         PORTK = B10000001 & SignalPaso;
135         Sensor1 = B00100000 & PORTF;
136     }
137     while (not(Sensor2))
138     {
139         SignalPaso = B10000010;    //Señal de Paso al Stepper 2
140         PORTK = B10000010 & SignalPaso;
141         delay(500);
142         SignalPaso = B10000000;
143         PORTK = B10000010 & SignalPaso;
144         Sensor2 = B01000000 & PORTF;
145     }
146     while (not(Sensor3))
147     {
148         SignalPaso = B10000100;    //Señal de Paso al Stepper 3
149         PORTK = B10000100 & SignalPaso;
150         delay(500);
151         SignalPaso = B10000000;
152         PORTK = B10000100 & SignalPaso;
153         Sensor3 = B10000000 & PORTF;
154     }
155     //Posiciones angulares de los Stepper en el Fin de Carrera
156     pos1f = 2700;
157     pos2f = 1300;
158     pos3f = 9500;
159 }
160
161 //4. Subrutina Mínimo Común Múltiplo. Algoritmo de Euclides *****//
162
163 int mcm(int a, int b, int c)
164 {
165     //MCM de los dos primeros números
166     //Cálculo del MCD de a y b
167     int iaux;    //auxiliar
168     int i1=max(a,b);    //i1 = el más grande
169     int i2=min(a,b);    //i2 = el más pequeño
170     int MCD;    //Máximo Común Divisor
171     int MCM;    //Mínimo Común Múltiplo
172     do
173     {
174         iaux = i2;    //guardar divisor
175         i2 = i1 % i2;    //resto pasa a divisor
176         i1 = iaux;    //divisor pasa a dividendo
177     } while (i2 != 0);
178     MCD = i1;
179     //Cálculo del MCM de a y b
180     MCM = (a / MCD) * b;
181
182     //MCM del resultado y el tercer número
183     //Cálculo del MCD del resultado y c
184     i1 = max(MCM,c);    //i1 = el más grande
185     i2 = min(MCM,c);    //i2 = el más pequeño
186     do
187     {

```

```

188    iaux = i2;           //guardar divisor
189     i2 = i1 % i2;      //resto pasa a divisor
190     i1 = iaux;         //divisor pasa a dividendo
191 } while (i2 != 0);
192 MCD = i1;
193 //Cálculo del MCM del resultado y c
194 MCM = (MCM / MCD) * c;
195 return MCM;
196 }
197
198 //5. Subrutina COMUNICACIÓN *****//
199
200 void LecturaValores(int recepcion) // Evento de recepción
201 {
202 //Actualización de las posiciones iniciales
203     pos1i = pos1f;
204     pos2i = pos2f;
205     pos3i = pos3f;
206
207 //Lectura de las posiciones finales y del tiempo
208     //Obtenemos pos1f, pos2f, pos3f, pos4, pos5 y tiempo
209
210     unsigned int i=0; //Contador
211
212     while (Wire.available()); //Lectura de todos los bytes
213     {
214         ang[i]=Wire.read(); //orden: ang[0] ang[1] ==> tiempo
215         i++; // ang[2 a 11] ==> ang1 a ang5 (2 byte por angulo)
216     }
217     tiempo = ang[0]*256 + ang[1]; //tiempo de duración del movimiento
218     pos1f = ang[2]*256+ang[3]; //Posición final Motor 1 (centésimas de grado)
219     pos2f = ang[4]*256+ang[5]; //Posición final Motor 2 (centésimas de grado)
220     pos3f = ang[6]*256+ang[7]; //Posición final Motor 3 (centésimas de grado)
221 }
222
223 //6. LOOP *****//
224
225 void loop()
226 {
227
228 //Inicialización de Stepper
229     Reset = B00001000 & PORTF;
230     if (Reset)
231     {
232         InicializaStepper();
233         SignalPaso = B00000000;
234     }
235
236 // Actualización de ángulos Stepper
237     ang1 = pos1f-pos1i;
238     ang2 = pos2f-pos2i;
239     ang3 = pos3f-pos3i;
240
241 // Escalado de los ángulos de los Servos a 1 byte
242     ang4 = (0.0568*(ang[8]*256+ang[9])); // (1023/180)/100 = 0.0568333
243     ang5 = (0.0568*(ang[10]*256+ang[11]));
244
245 // Movimiento de los Servos hasta la posición final (PWM)
246     Servo4.write(ang4);
247     Servo5.write(ang5);
248

```

```

249 //Cálculo de la dirección de giro de los Stepper
250 if (ang1>0) SignalDir = SignalDir | B00000001;
251 else SignalDir = SignalDir & B11111110;
252 if (ang1>0) SignalDir = SignalDir | B00000010;
253 else SignalDir = SignalDir & B11111101;
254 if (ang3>0) SignalDir = SignalDir | B00000100;
255 else SignalDir = SignalDir & B11111011;
256
257 //Señal Dirección a los Integrados
258 PORTF = B0000111 & SignalDir;
259
260 // Cálculo de pasos de cada Stepper
261 paso1 = (int)ang1/pasomin;
262 paso2 = (int)ang2/pasomin;
263 paso3 = (int)ang3/pasomin;
264
265 //Cálculo del mcm de los pasos
266 pasomax = mcm(paso1, paso2, paso3);
267
268 //Cálculo número de flancos Timer por paso
269 f1 = pasomax/paso1;
270 f2 = pasomax/paso2;
271 f3 = pasomax/paso3;
272
273 //Actualización Parámetros Timer
274 maxTimer = (int) (Ci*tiempo)/(pasomax*tTimer);
275 OCR3A = (int)maxTimer/2; //Registro de comparación del Timer 3
276
277 //Control de los pasos dados
278 if (pasoactual>=pasomax) {
279     estado = 0;
280 }
281 }
282
283 //7. Interrupción 1 (Configuración frecuencia Timer)*****//
284
285
286 void Interrupcion1 () //Interrupcion activada mediante el Pin 3 para inicializar el Timer
287 {
288     pasoactual = 0;
289     TIMSK3 |= (1 << TOIE3); //enable timer overflow interrupt
290     estado = 1; //Cambio a estado 1 (aceleración)
291     n = 1;
292     Ci = Const/tiempo; //Co, primer coeficiente de aceleración
293     pasosmitad = (int)450*tiempo; //Pasos hasta mitad de recorrido
294 }
295

```

```

296 //8. Interrupción 2 (Movimiento paso motores)*****
297
298 ISR(TIMER3_OVF_vect) //Interrupción activada con el Timer
299 {
300 //Elección inicio de paso siguiente (caso 1) o final de paso anterior (caso 2)
301
302 //CASO 1
303 if (not(RISE)) {
304 //Deshabilitación Integrados
305 SignalPaso = B00000000;
306 //Envío de Señal de paso a los integrados
307 PORTK = B1000111 & SignalPaso;
308 //Cambio a caso 2
309 RISE = true;
310 }
311 //FIN CASO 1
312
313 //CASO 2
314 else {
315 //Habilitación Integrados
316 SignalPaso = B10000000;
317 PORTK = B1000111 & SignalPaso;
318
319 //Aumento de contadores
320 i1++;
321 i2++;
322 i3++;
323
324 //Señal de Paso de los Servos
325 if (i1<f1) SignalPaso = SignalPaso & 11111110;
326 else {
327 SignalPaso = SignalPaso | 00000001;
328 i1=0;
329 }
330
331 if (i2<f2) SignalPaso = SignalPaso & 11111101;
332 else {
333 SignalPaso = SignalPaso | 00000010;
334 i2=0;
335 }
336
337 if (i3<f3) SignalPaso = SignalPaso & 11111011;
338 else {
339 SignalPaso = SignalPaso | 00000100;
340 i3=0;
341 }
342
343 //Envío de Señal de paso a los integrados ¿?¿?
344 PORTK = 1000111 & SignalPaso;
345
346 //Aumento Contador de pasos
347 pasoactual++;
348

```

```

349 //Máquina de Estados
350 //Estado 0 (STOP)
351 if (estado = 0) {
352     TIMSK3 |= (0 << TOIE3);    //disable timer overflow interrupt
353 }
354 //Estado 1 (ACELERACIÓN)
355 if (estado = 1) {
356     Ci=Cii;
357     Cii = Ci - (2*Ci)/(4*n+1);
358     n++;
359     if ((tiempo < tacel) and (pasoactual = pasosmitad)) {
360         estado = 3;
361         n = 1;
362     }
363     else if ((tiempo > tacel) and (pasoactual = pasoacel)){
364         estado = 2;
365     }
366     else estado = 1;
367 }
368
369 //Estado 2 (RUN)
370 if (estado = 2) {
371     Ci=1;
372     if (pasoactual = (pasomax-pasoacel)) {
373         estado = 3;
374         n=1;
375     }
376     else {
377         estado = 2;
378     }
379 }
380
381 //Estado 3 (DECELERACIÓN)
382 if (estado = 3) {
383     Ci=Cii;
384     Cii = Ci + (2*Ci)/(4*n+1);
385     n++;
386     if (pasoactual = pasomax) {
387         estado = 0;
388     }
389     else {
390         estado = 3;
391     }
392 }
393
394 //Cambio a caso 2
395 RISE = false;
396 }
397     //FIN CASO 2
398
399 }
400
401 //FIN

```

5.3 IMPLEMENTACIÓN HARDWARE

Como se ha indicado en la *Sección 10*, se muestra en la *Figura 68* el esquemático del montaje Hardware del sistema de control.

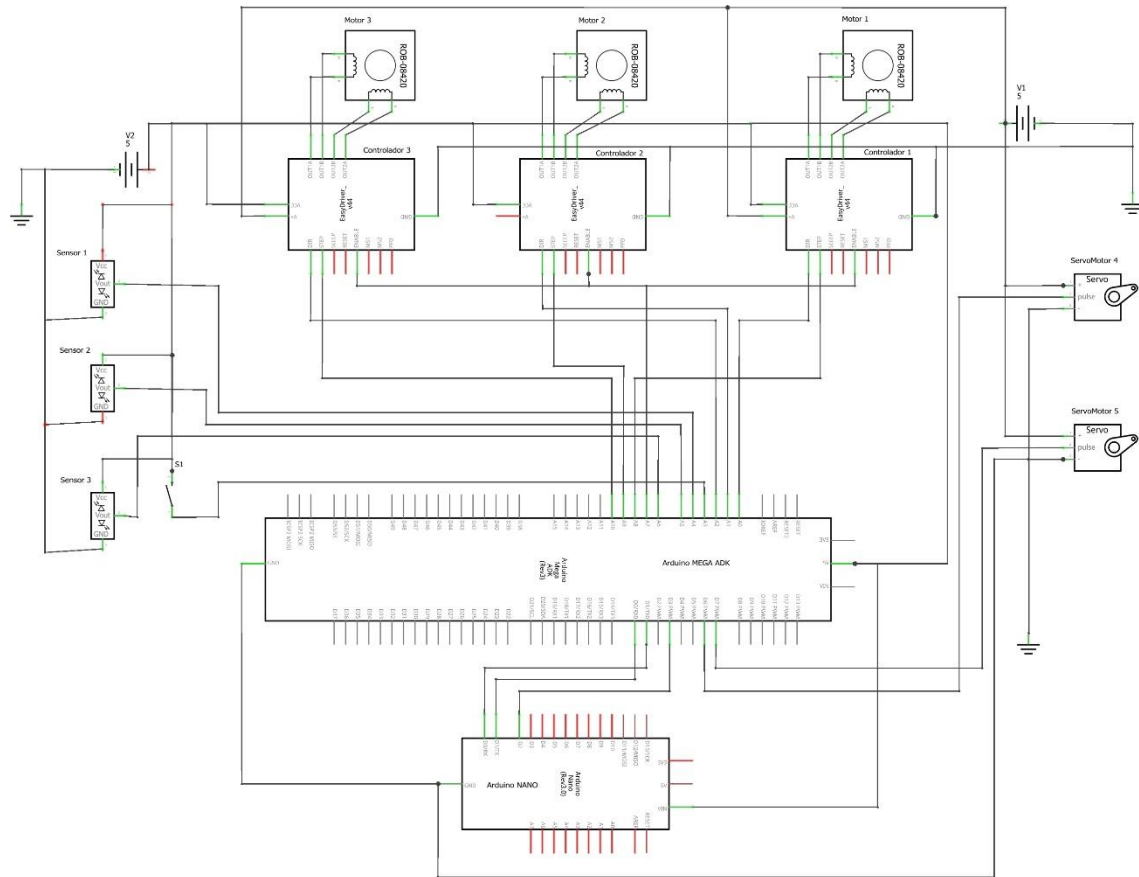
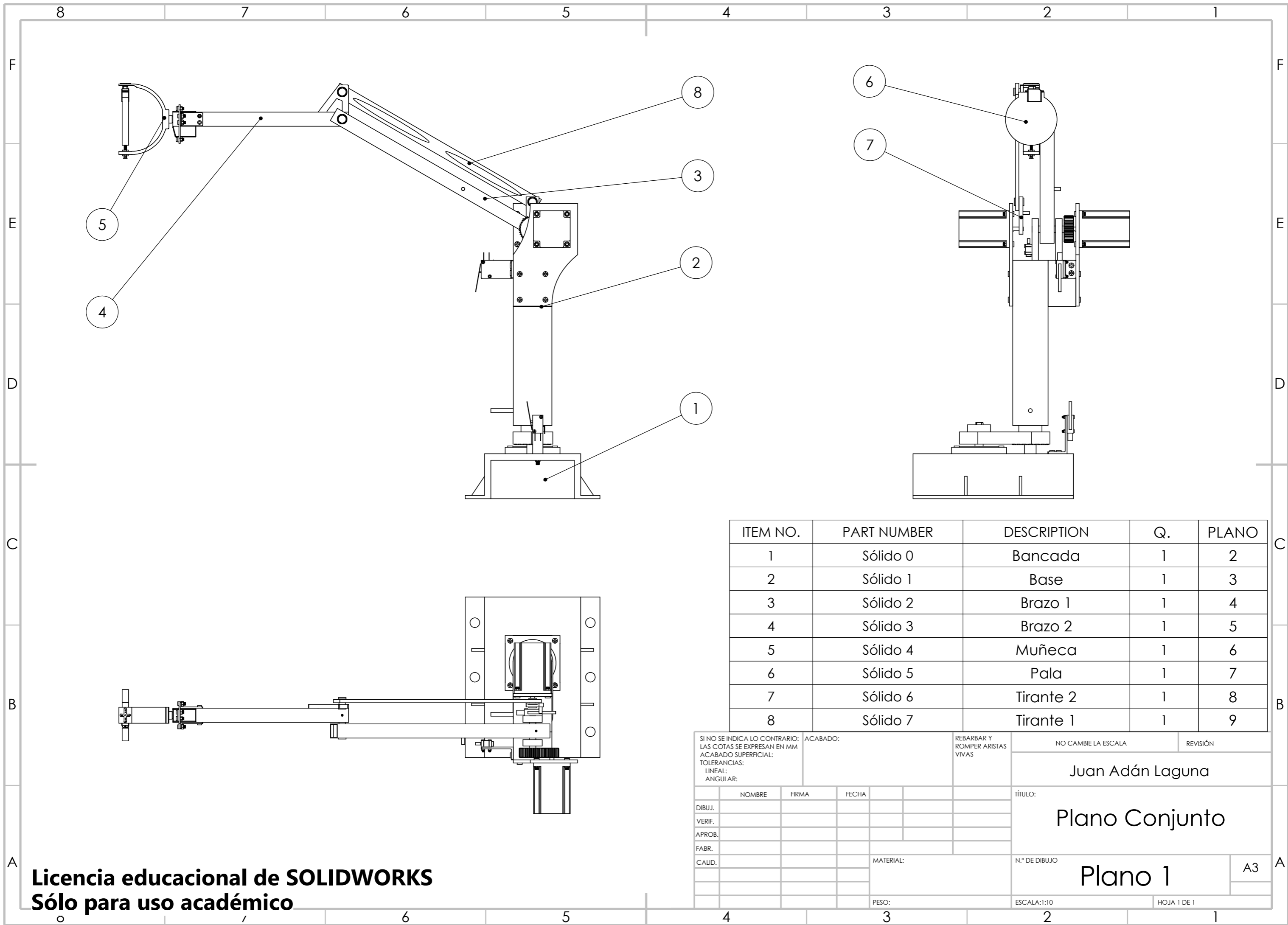


Figura 68. Esquemático Hardware de Control

ANEXO 6. PLANOS

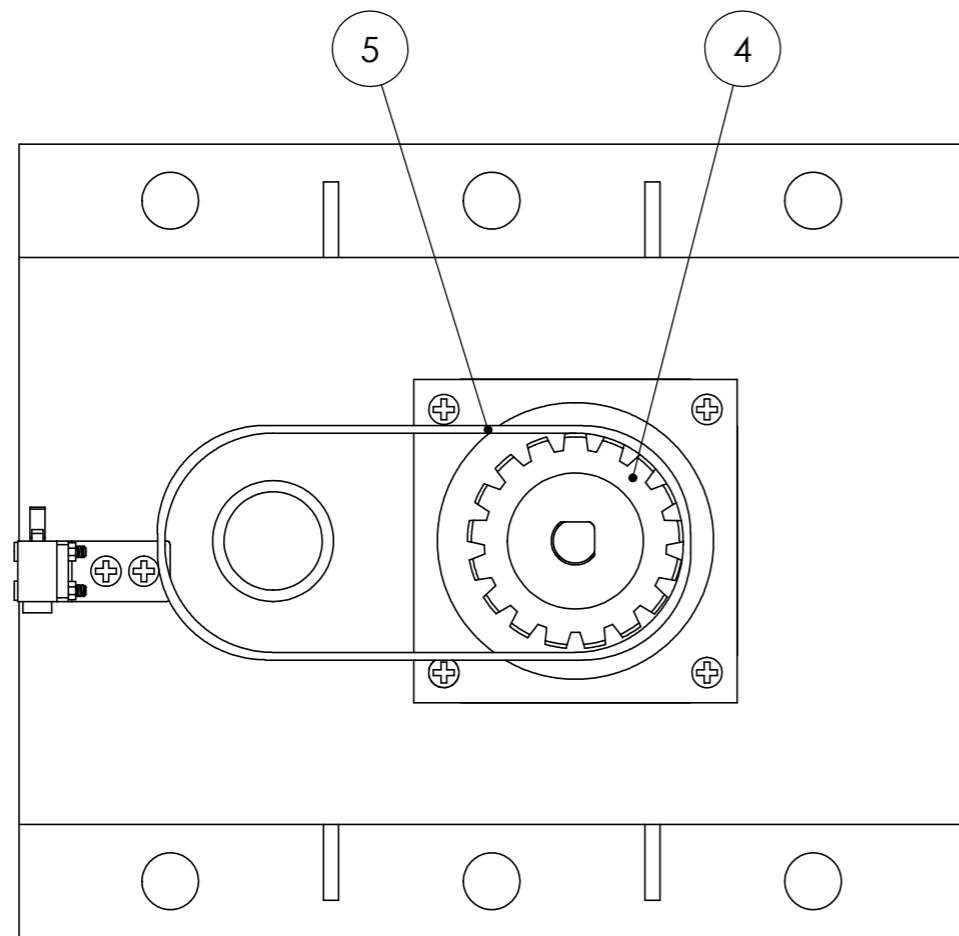
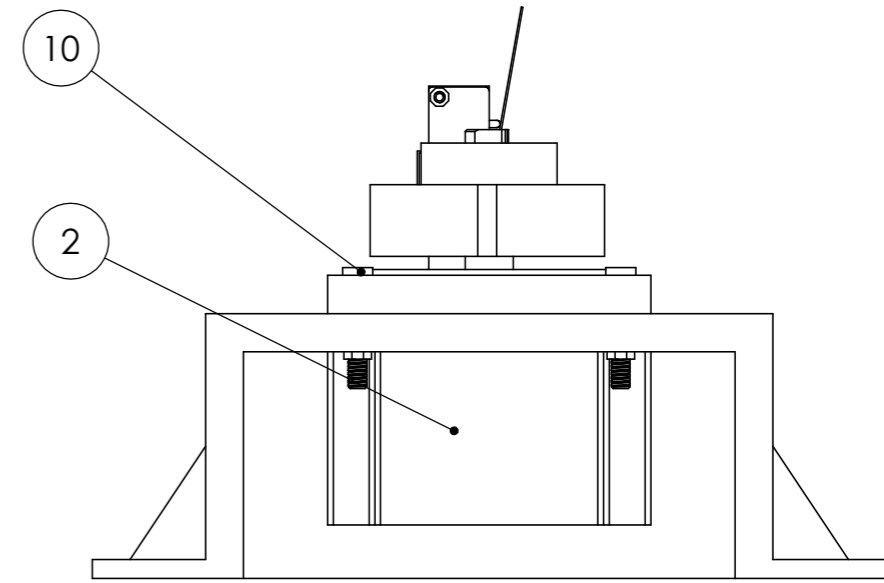
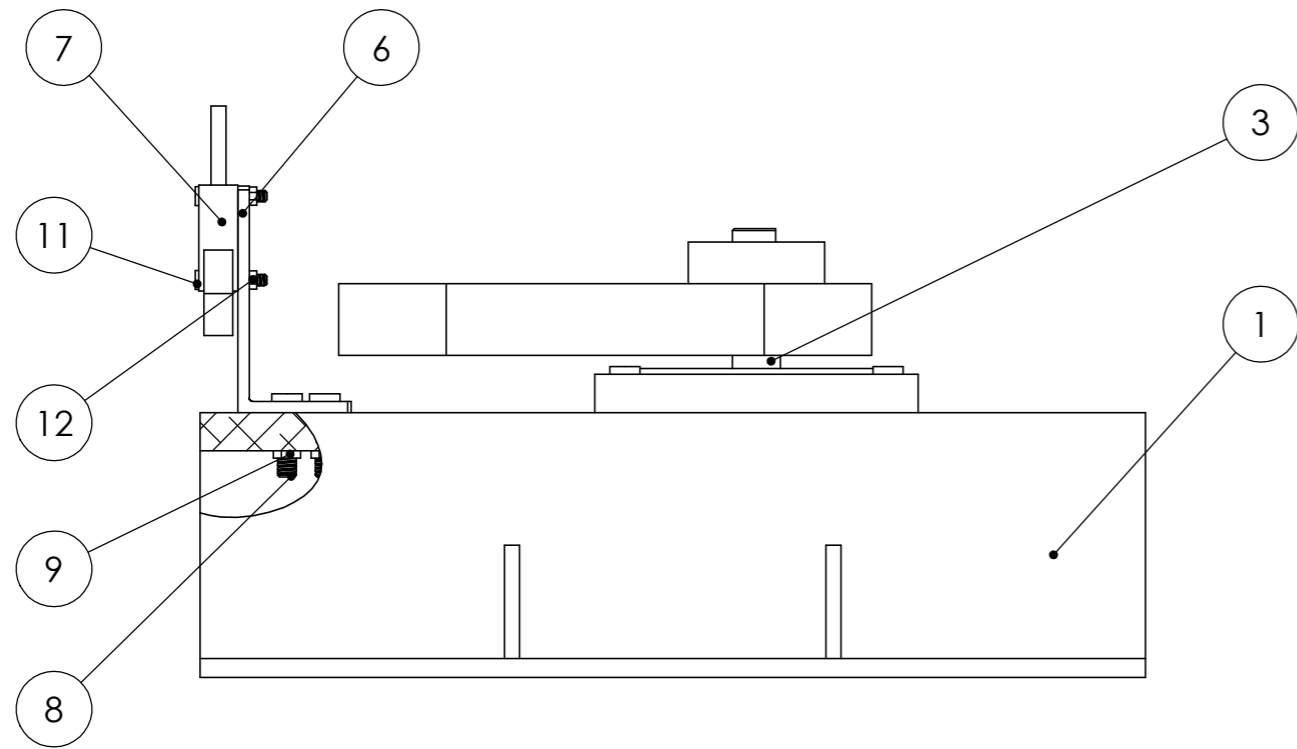
En las siguientes páginas de este Anexo se incluyen los Planos de Conjunto y Planos de Pieza correspondientes al diseño del Brazo Robótico del presente trabajo.



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	Q.	PLANO
1	Sólido 0	Bancada	1	2
2	Sólido 1	Base	1	3
3	Sólido 2	Brazo 1	1	4
4	Sólido 3	Brazo 2	1	5
5	Sólido 4	Muñeca	1	6
6	Sólido 5	Pala	1	7
7	Sólido 6	Tirante 2	1	8
8	Sólido 7	Tirante 1	1	9

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM					Juan Adán Laguna			
ACABADO SUPERFICIAL:					TÍTULO:			
TOLERANCIAS:					Plano Conjunto			
LINEAL:					N.º DE DIBUJO			
ANGULAR:					Plano 1			
					A3			
					ESCALA:1:10			
					HOJA 1 DE 1			

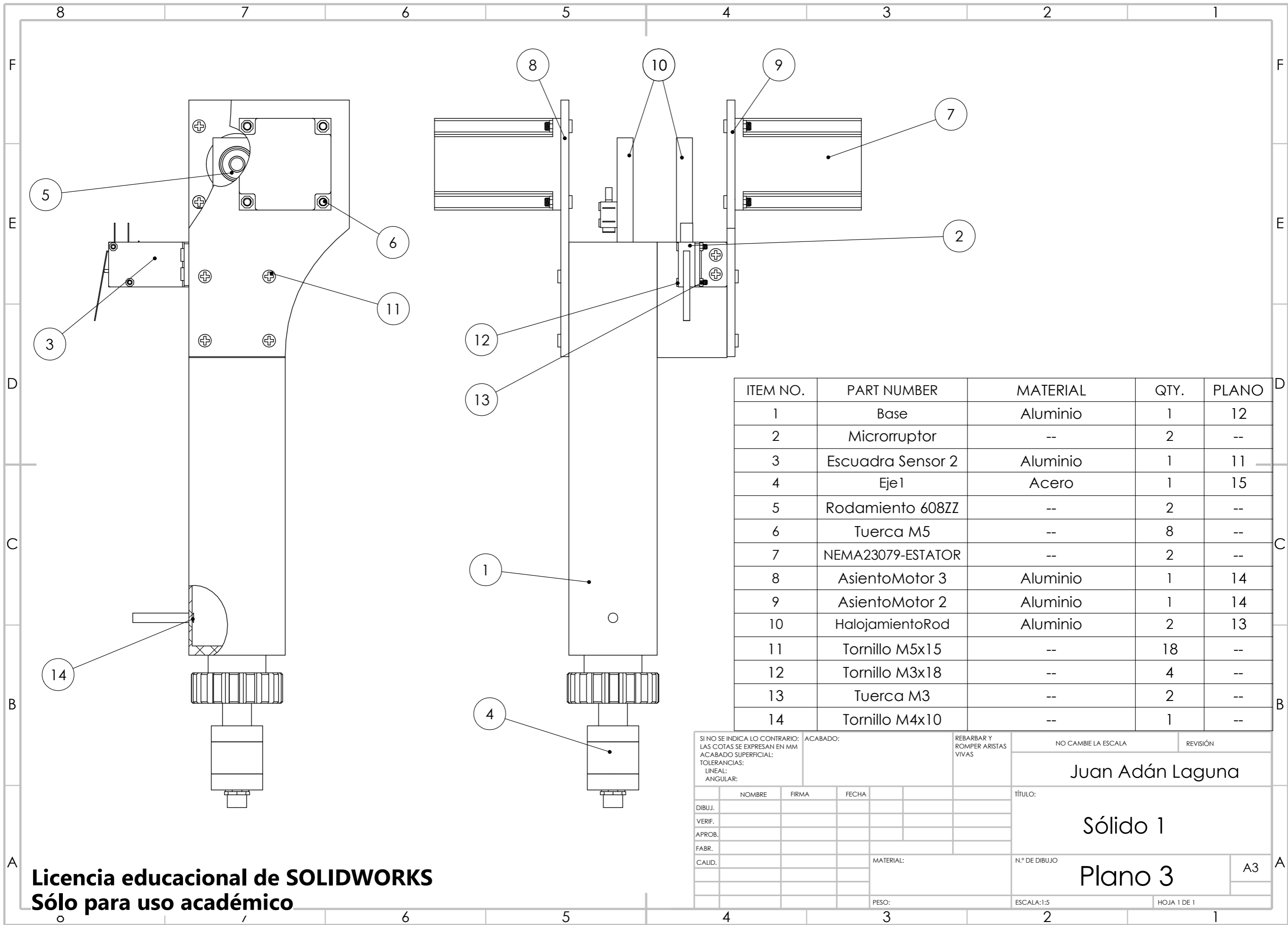
Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



ITEM NO.	PART NUMBER	Material	Q.	PLANO
1	Bancada	Acero	1	10
2	NEMA34066-ESTATOR	--	1	--
3	NEMA34066-ROTOR	--	1	--
4	PoleaDentada	Acero	1	--
5	Correa	Caucho	1	--
6	EscuadraSensor1	Aluminio	1	11
7	Microrruptor	--	1	--
8	Tornillo M5x20	--	2	--
9	Tuerca M5	--	6	--
10	Tornillo M5x30	--	4	--
11	Tornillo M3x18	--	2	--
12	Tuerca M3	--	2	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
					Juan Adán Laguna			
					TÍTULO: Sólido 0			
					N.º DE DIBUJO		A3	
					ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	

Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Base	Aluminio	1	12
2	Microrruptor	--	2	--
3	Escuadra Sensor 2	Aluminio	1	11
4	Eje1	Acero	1	15
5	Rodamiento 608ZZ	--	2	--
6	Tuerca M5	--	8	--
7	NEMA23079-ESTATOR	--	2	--
8	AsientoMotor 3	Aluminio	1	14
9	AsientoMotor 2	Aluminio	1	14
10	HalojamientoRod	Aluminio	2	13
11	Tornillo M5x15	--	18	--
12	Tornillo M3x18	--	4	--
13	Tuerca M3	--	2	--
14	Tornillo M4x10	--	1	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN

Juan Adán Laguna

TÍTULO: Sólido 1

N.º DE DIBUJO: Plano 3

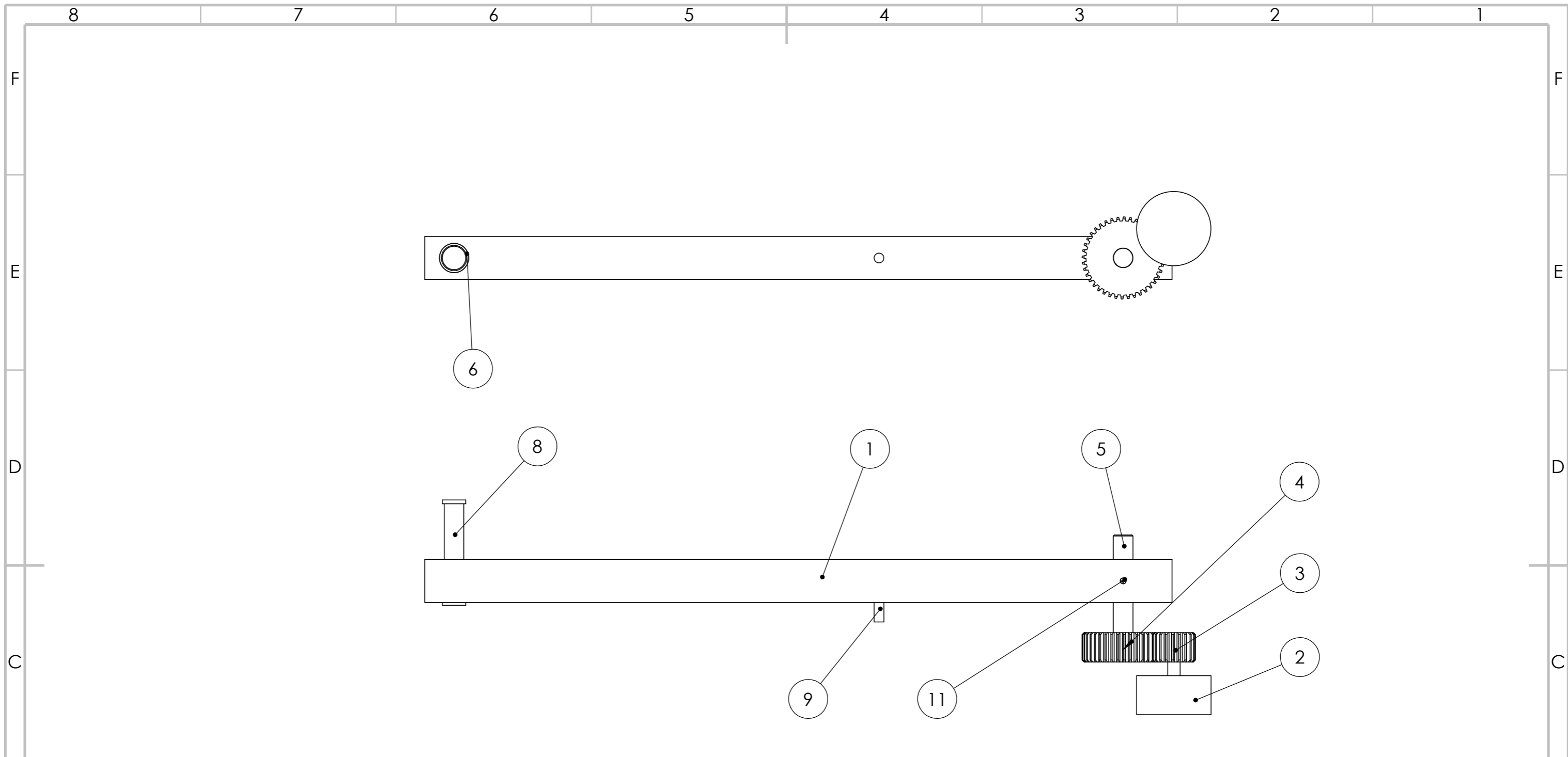
A3

ESCALA:1:5 HOJA 1 DE 1

NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.		
VERIF.		
APROB.		
FABR.		
CALID.		

MATERIAL: PESO:

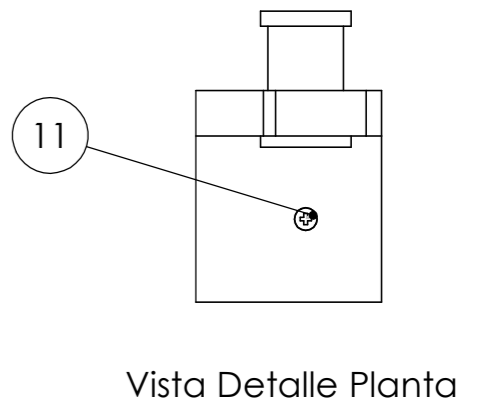
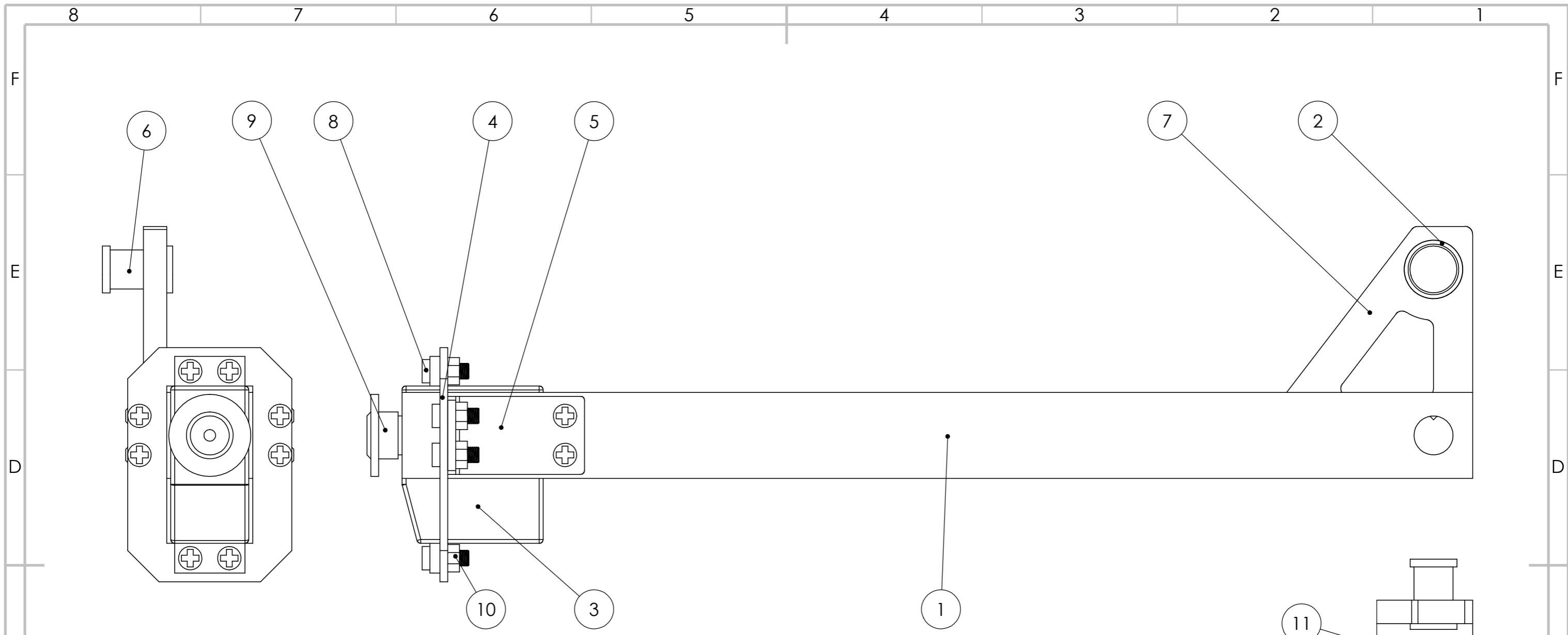
Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Brazo1	Aluminio	1	16
2	NEMA23079-Rotor	--	1	--
3	PiñonReductora	--	1	--
4	RuedaReductora	--	1	--
5	EjeReductora	Acero	1	17
6	624ZZ-Exterior	--	2	--
7	624ZZ-Interior	--	2	--
8	Pasador	Aluminio	1	18
9	Bulón 1	Aluminio	1	--
			1	--
			1	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Juan Adán Laguna	
				TÍTULO:	
				Sólido 2	
				N.º DE DIBUJO	
				Plano 4	
				A3	
				ESCALA:1:5	
				HOJA 1 DE 1	

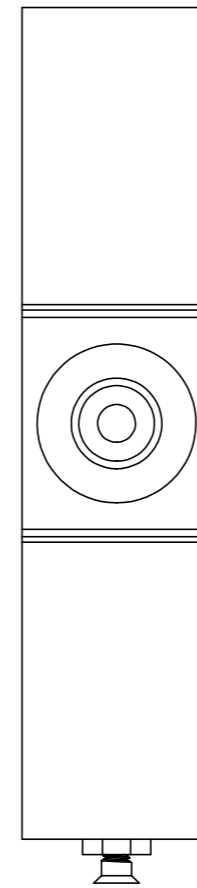
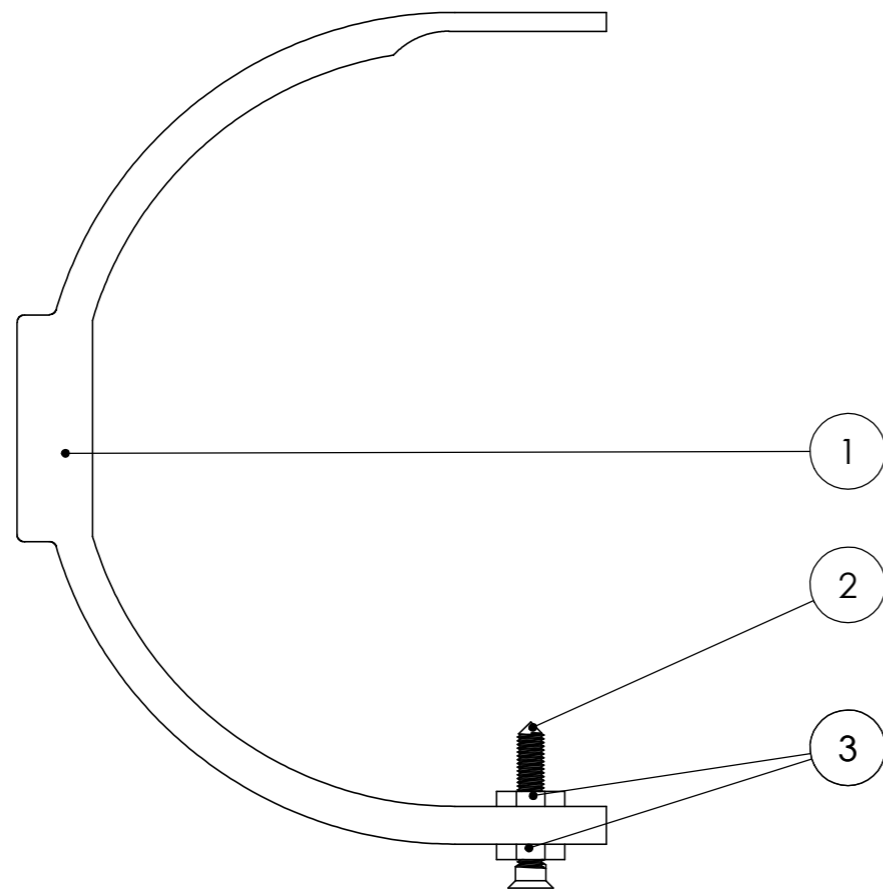
Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Brazo2	Aluminio	1	19
2	Rodamiento 624ZZ	--	1	--
3	Futaba 3003	--	1	--
4	Asiento Futaba 3003	Aluminio	1	20
5	Escuadra Brazo2	Aluminio	2	11
6	Pasador Mediano	Aluminio	1	18
7	Tirante 3	Aluminio	1	21
8	Tornillo2 M4x10	--	14	--
9	Futaba3003 Aspa	--	1	--
10	Tuerca2 M4	--	12	--
11	Tornillo Eje	--	1	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Juan Adán Laguna	
				TÍTULO: Sólido 3	
				N.º DE DIBUJO Plano 5	
				ESCALA:1:5	
				HOJA 1 DE 1	

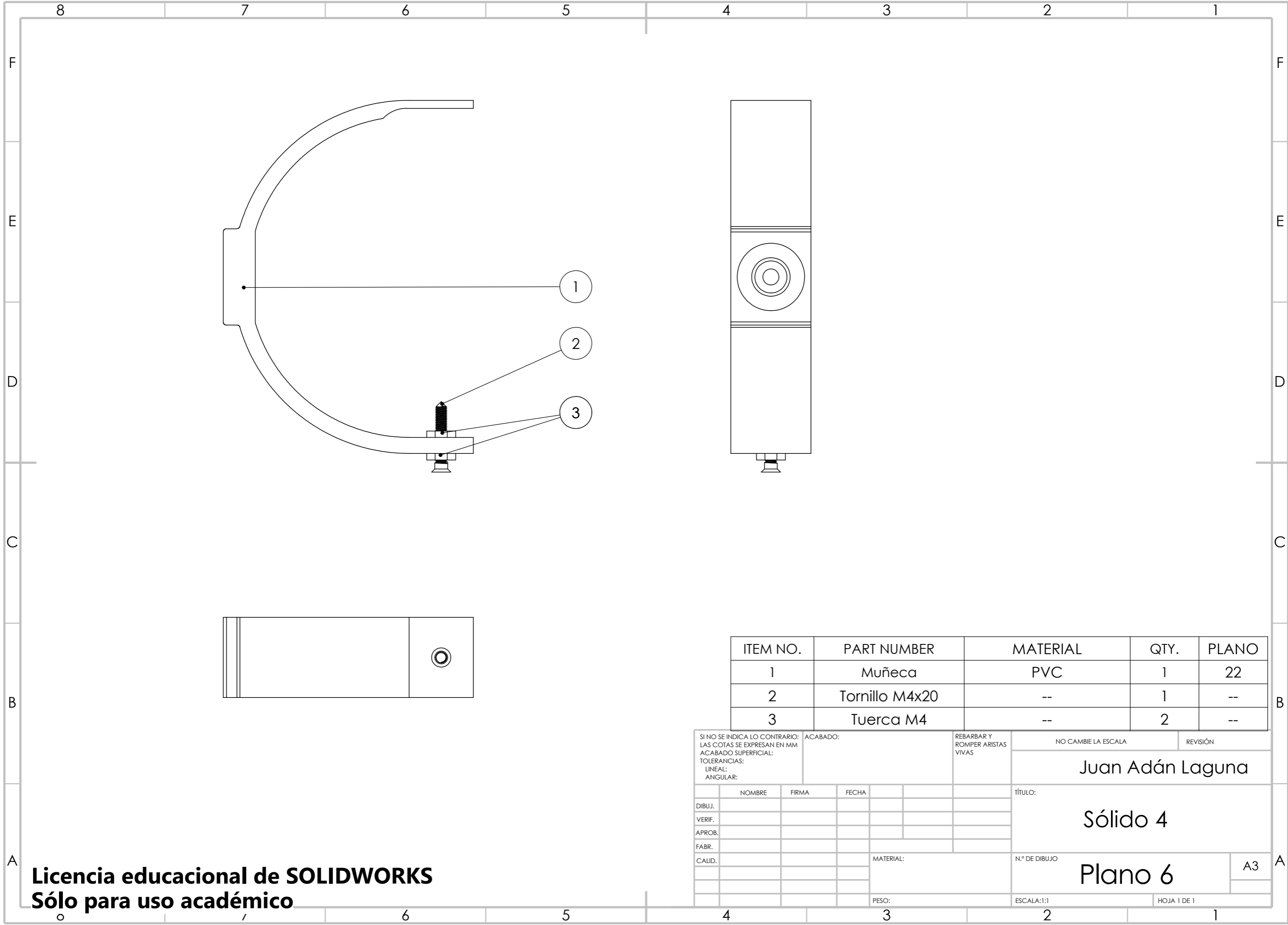
Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Muñeca	PVC	1	22
2	Tornillo M4x20	--	1	--
3	Tuerca M4	--	2	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM			ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:							TÍTULO:		Juan Adán Laguna	
TOLERANCIAS:							DIBUJ.			
LINEAL:							VERIF.			
ANGULAR:							APROB.			
							FABR.			
							CALID.			
							MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
									Plano 6	
							PESO:		ESCALA:1:1	
									HOJA 1 DE 1	

Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

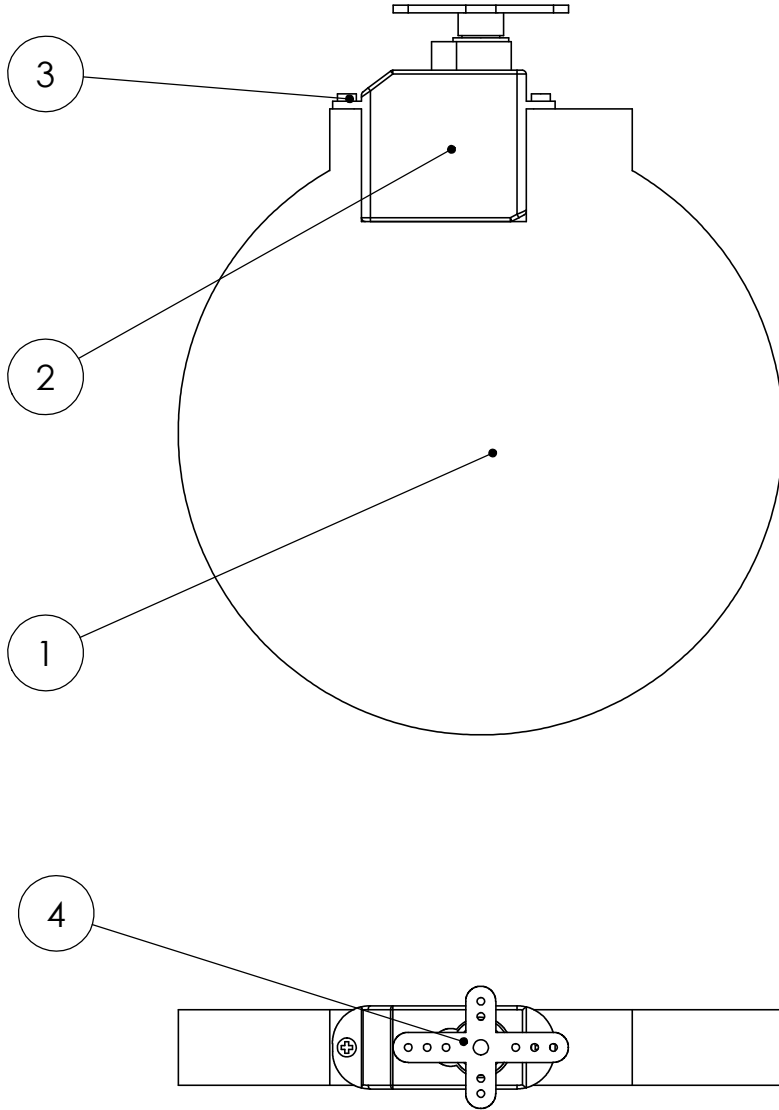
C

B

B

A

A



ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Pala	Madera Contrachapado	1	24
2	Futaba3111	--	1	--
3	Tornillo M2x5	--	2	--
4	Futaba3111 Aspa	--	1	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
Sólido 5
Plano 7
 N.º DE DIBUJO
 A4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

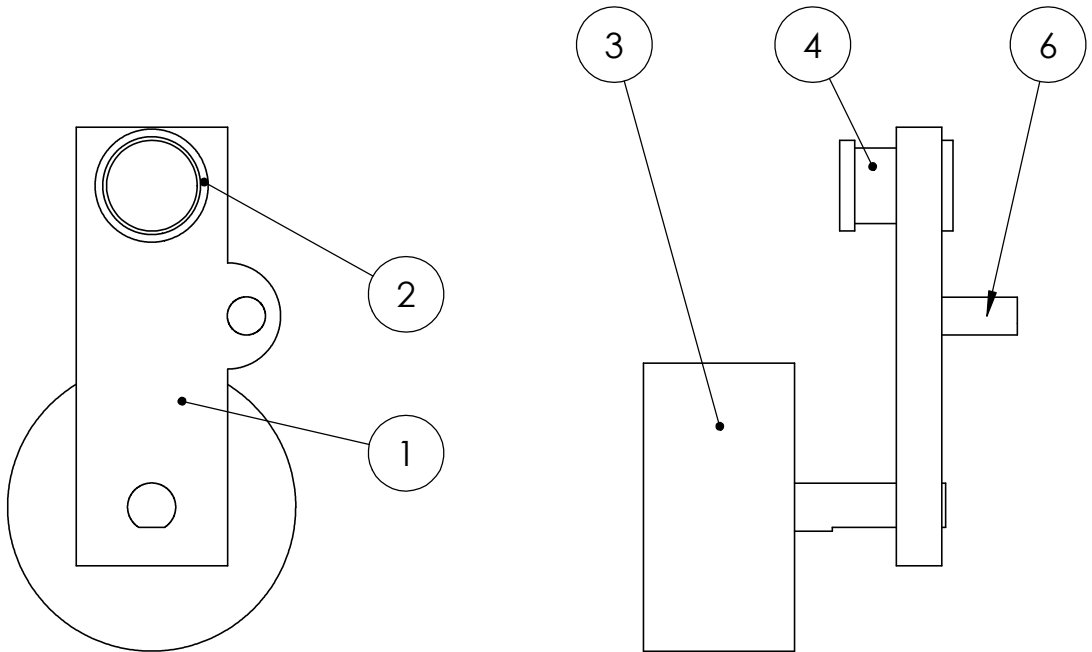
C

B

B

A

A



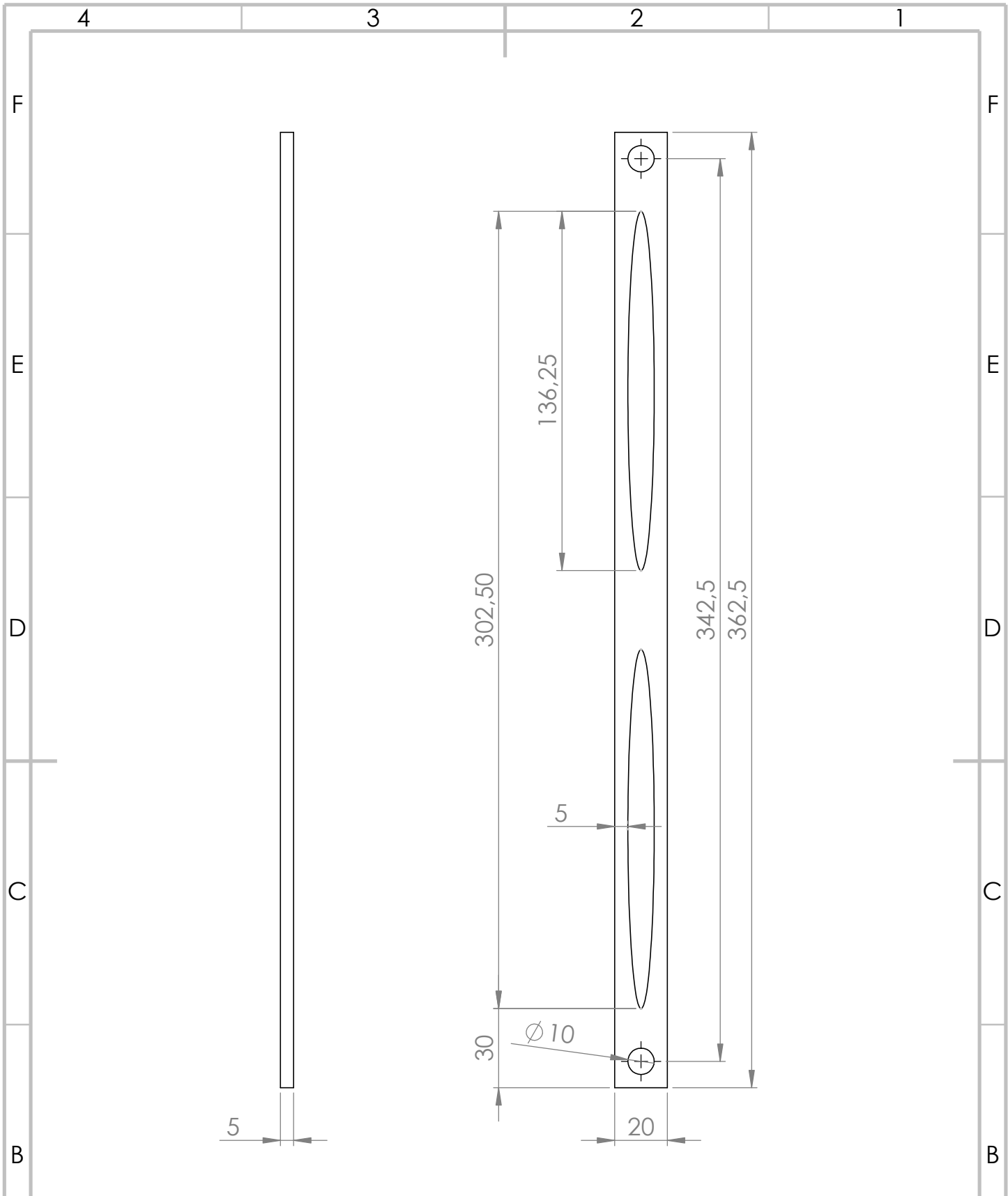
ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Tirante 2	Aluminio	1	23
2	Rodamiento 624ZZ	--	1	--
3	NEMA23079-Rotor	--	1	--
4	Pasador Pequeño	Aluminio	1	18
5	Bulón 2	Aluminio	1	--
6	Tornillo3	--	1	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Juan Adán Laguna	
				TÍTULO: Tirante 2	
NOMBRE			FIRMA	FECHA	
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
				Plano 8	A4

3

2

1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

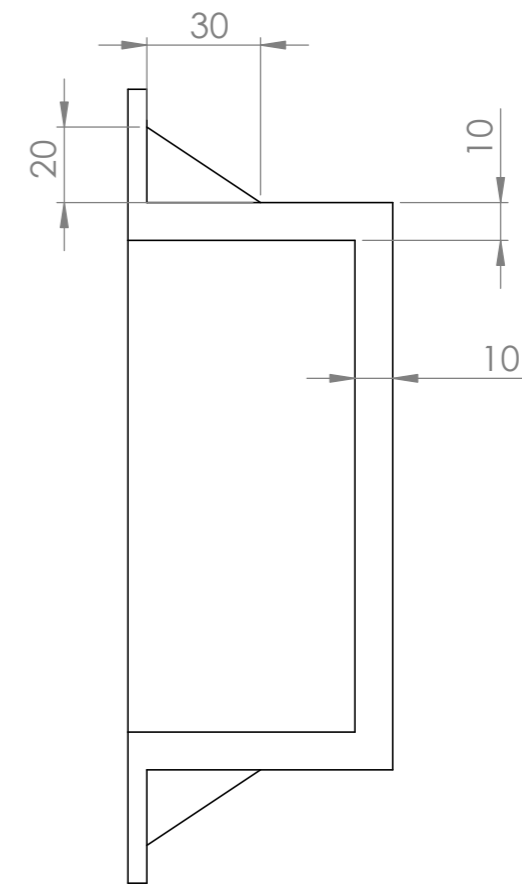
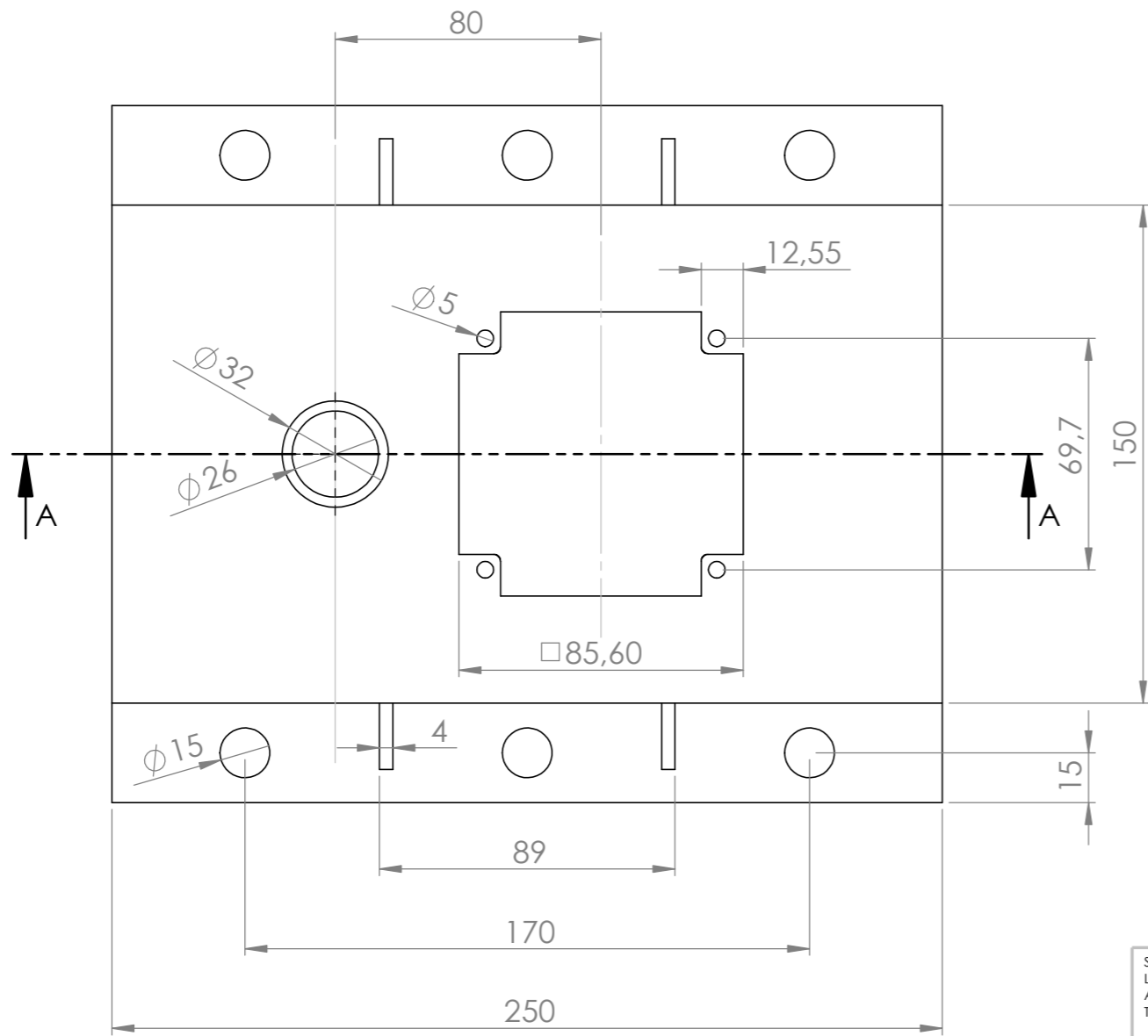
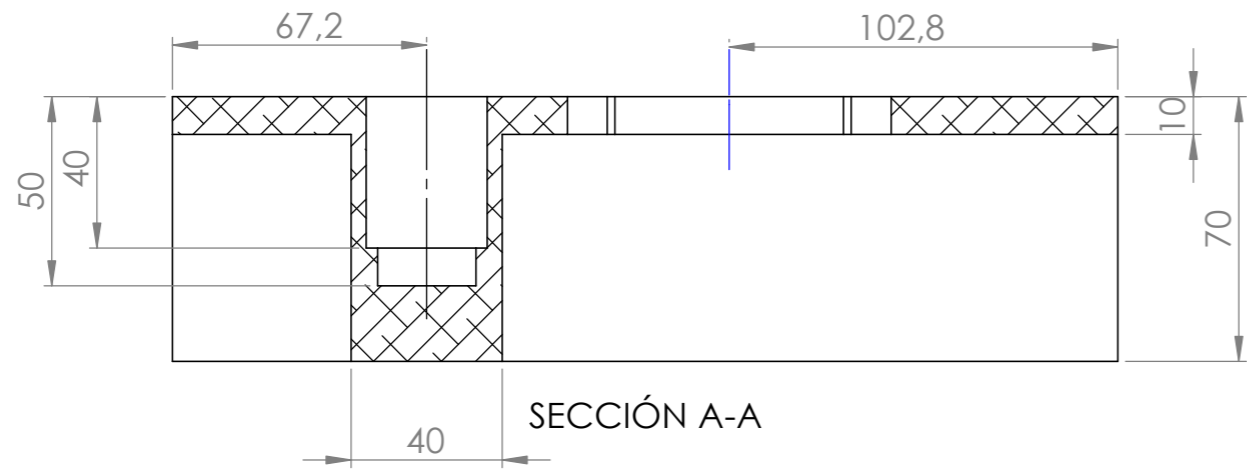
 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN
 Juan Adán Laguna

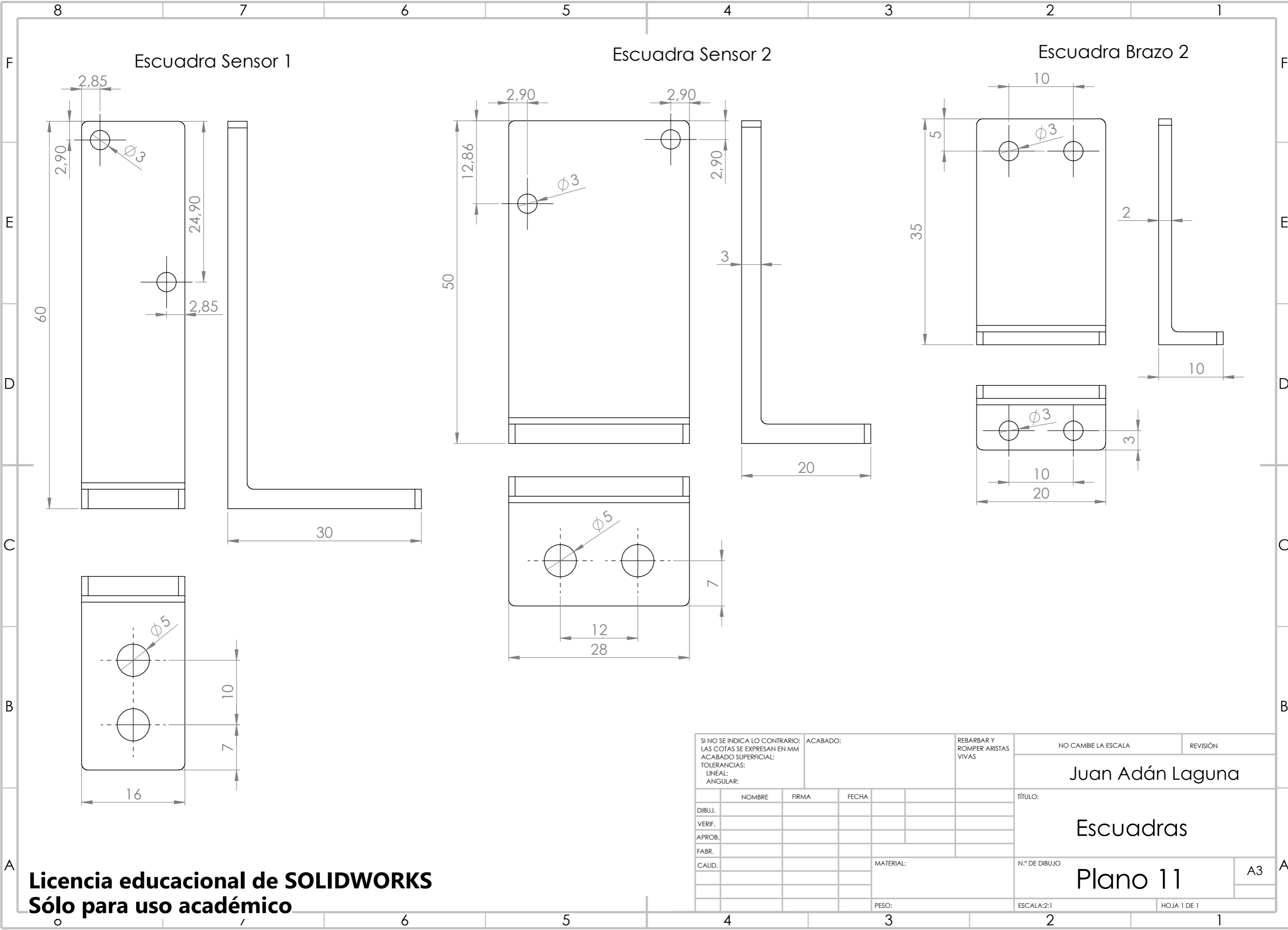
	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:
 Sólido 7
 Plano 9
 N.º DE DIBUJO
 A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
						Juan Adán Laguna			
						TÍTULO:			
						Bancada			
						N.º DE DIBUJO		A3	
						Plano 10			
						ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	

Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico



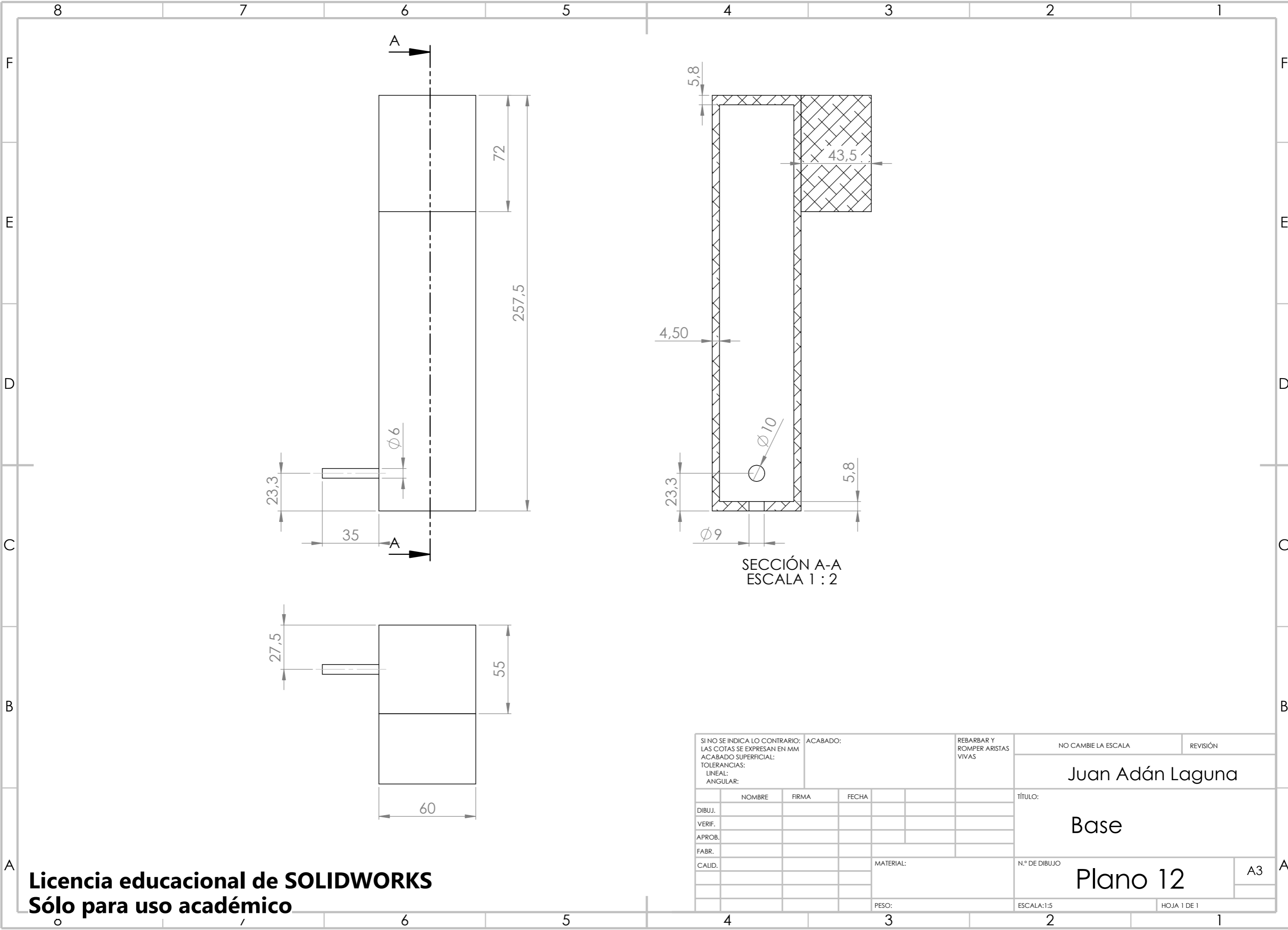
Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
					Juan Adán Laguna	
					TÍTULO:	
					Escuadras	
					N.º DE DIBUJO	
					Plano 11	
					A3	
					ESCALA:2:1	
					HOJA 1 DE 1	

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

MATERIAL:

PESO:



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
						Juan Adán Laguna	
						TÍTULO:	
						Base	
						N.º DE DIBUJO	A3
						Plano 12	
						PESO:	ESCALA:1:5
						HOJA 1 DE 1	

Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico

4

3

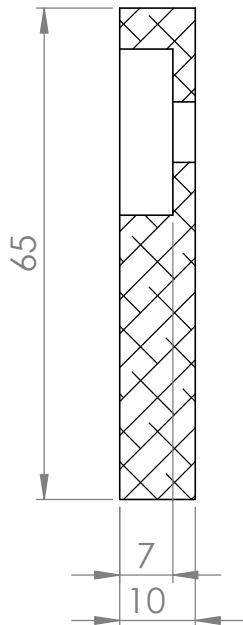
2

1

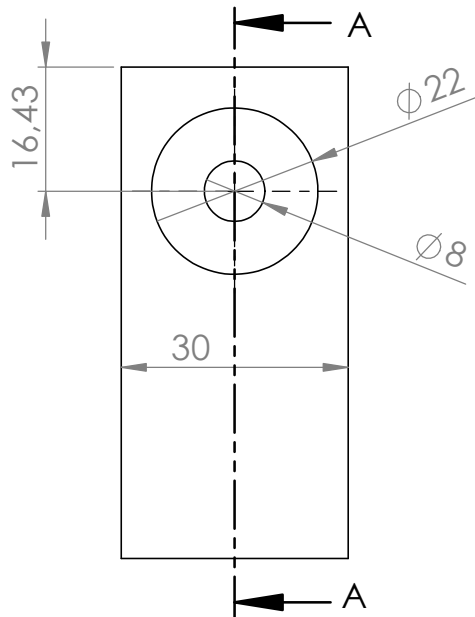
F

F

SECCIÓN A-A ESCALA 1 : 1



Alojamiento Rodamientos



E

E

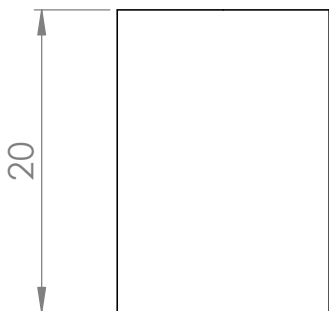
Casquillo Exterior



D

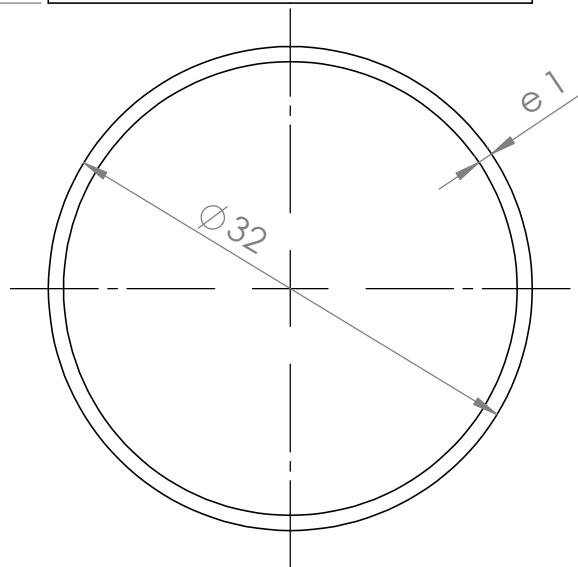
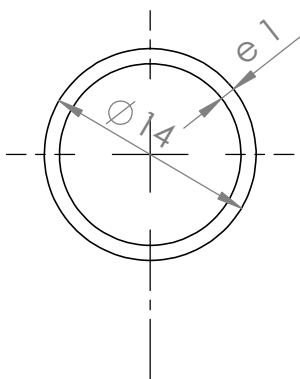
D

Casquillo Interior



C

C



B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
**Alojamiento Rod.
Casquillos**

N.º DE DIBUJO

Plano 13

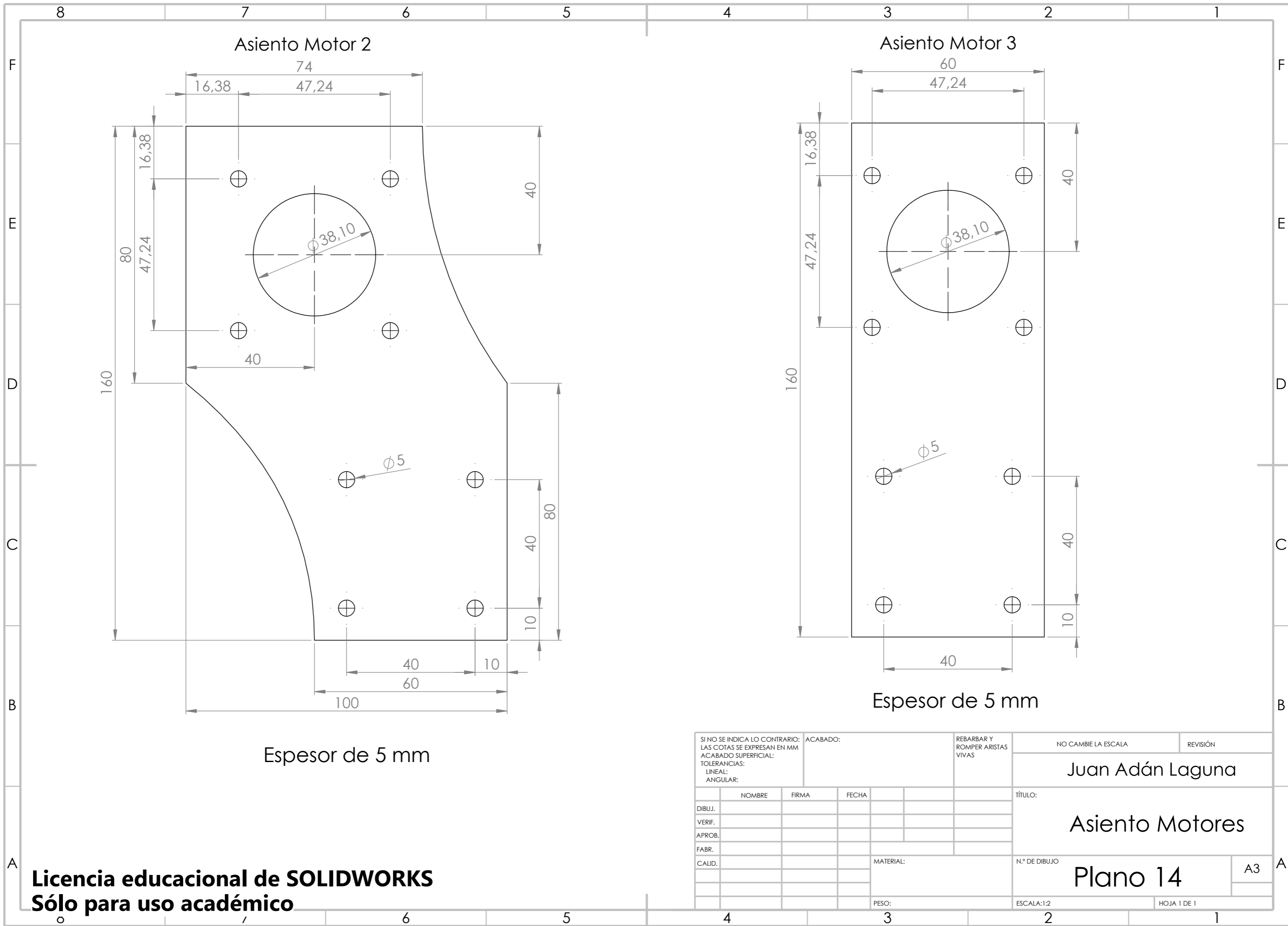
A4

3

2

1

A



Asiento Motor 2

Asiento Motor 3

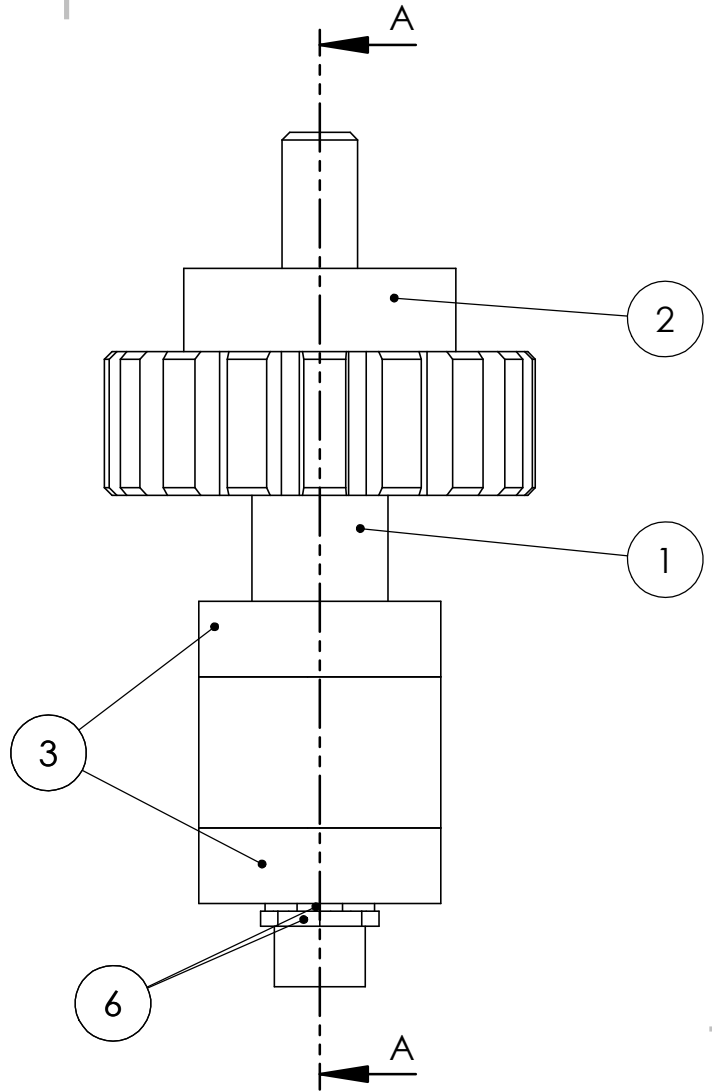
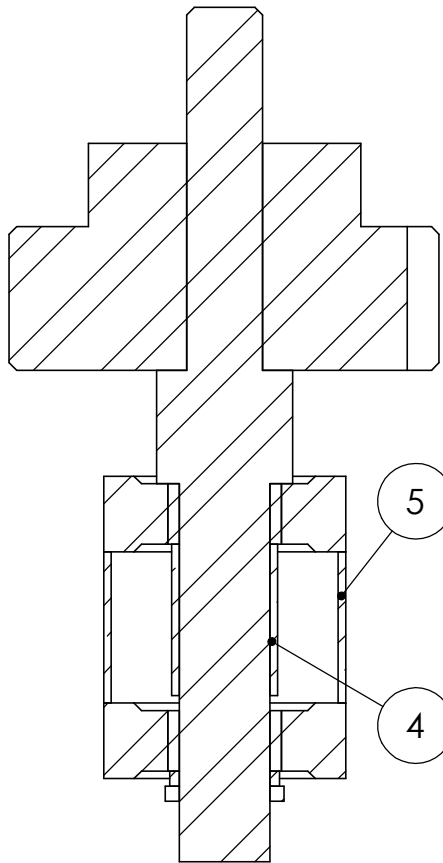
Espesor de 5 mm

Espesor de 5 mm

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
					Juan Adán Laguna	
					TÍTULO:	
					Asiento Motores	
					N.º DE DIBUJO	
					Plano 14	
					ESCALA:1:2	
					HOJA 1 DE 1	

Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico

A3



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

ITEM NO.	PART NUMBER	MATERIAL	QTY.	PLANO
1	Eje1	Acero	1	17
2	PoleaDentada	--	1	--
3	NSK7201BEAT85	--	2	--
4	CasquilloInt	Latón	1	13
5	CasquilloExt	Latón	1	13
6	Tuerca Eje	--	2	--

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

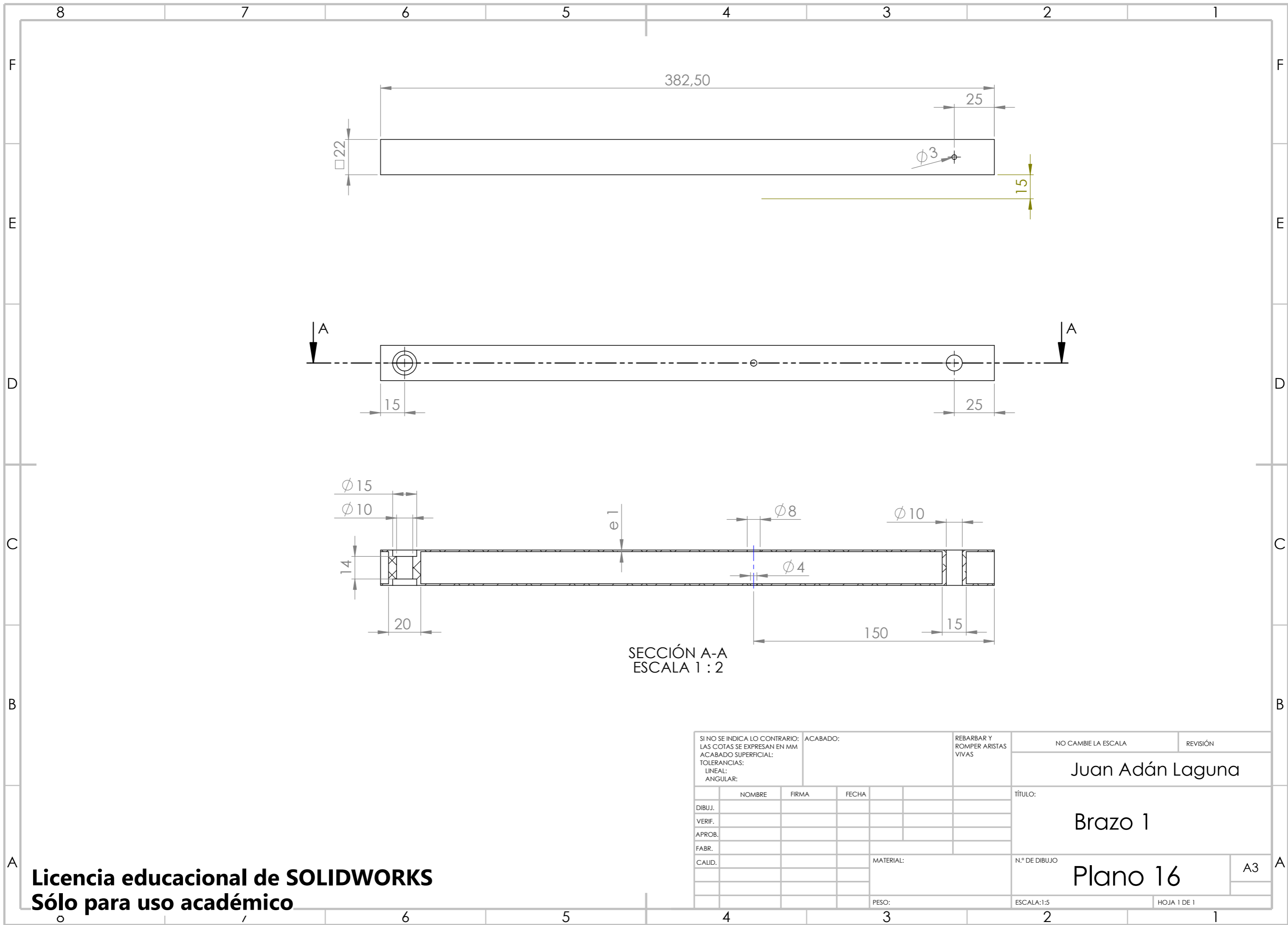
TÍTULO:

Conjunto Eje

N.º DE DIBUJO

Plano 15

A4



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Juan Adán Laguna	
				TÍTULO:	
				Brazo 1	
				N.º DE DIBUJO	
				Plano 16	
				A3	
				ESCALA:1:5	
				HOJA 1 DE 1	

Licencia educacional de SOLIDWORKS
Sólo para uso académico

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

C

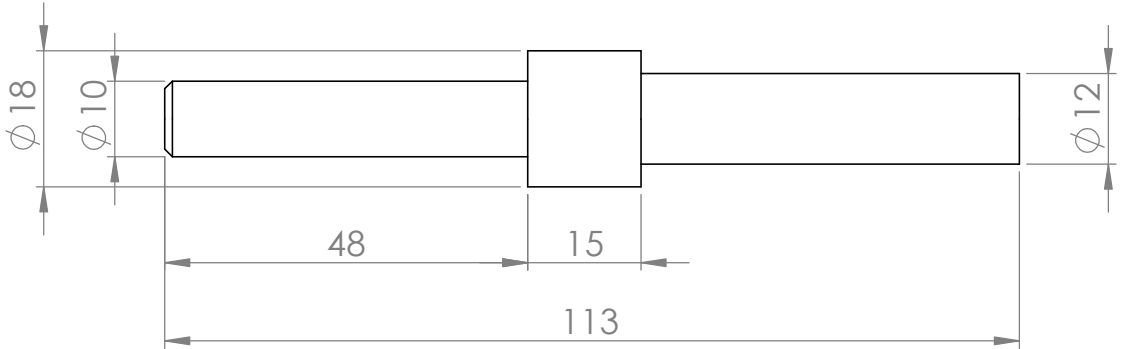
B

B

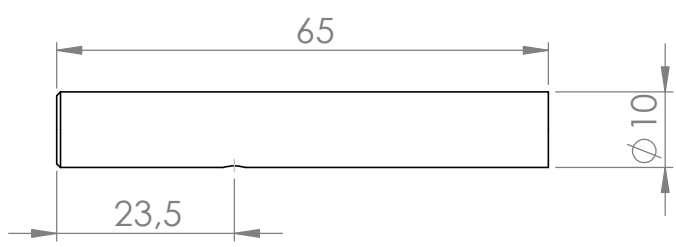
A

A

Eje 1



Eje Reductora



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:
Ejes

N.º DE DIBUJO
Plano 17

A4

3

2

1

4

3

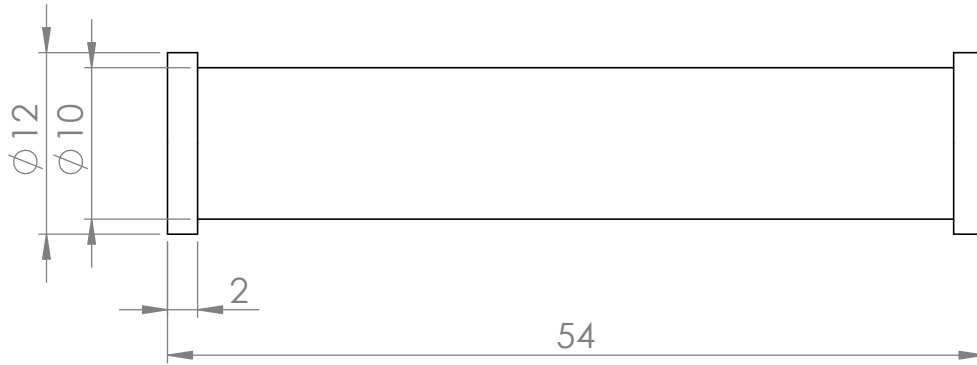
2

1

F

Pasador Grande

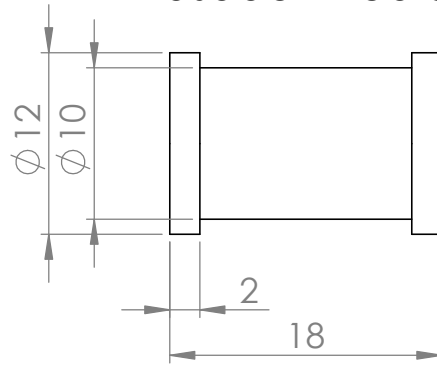
F



E

E

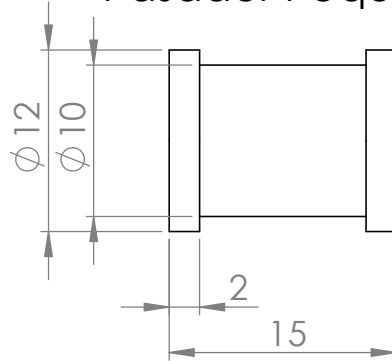
Pasador Mediano



D

D

Pasador Pequeño



C

C

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Pasadores

N.º DE DIBUJO

Plano 18

A4

Licencia educacional de **SOLIDWORKS**
Sólo para uso académico

ESCALA:2:1

HOJA 1 DE 1

3

2

1

A

A

4

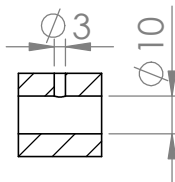
3

2

1

F

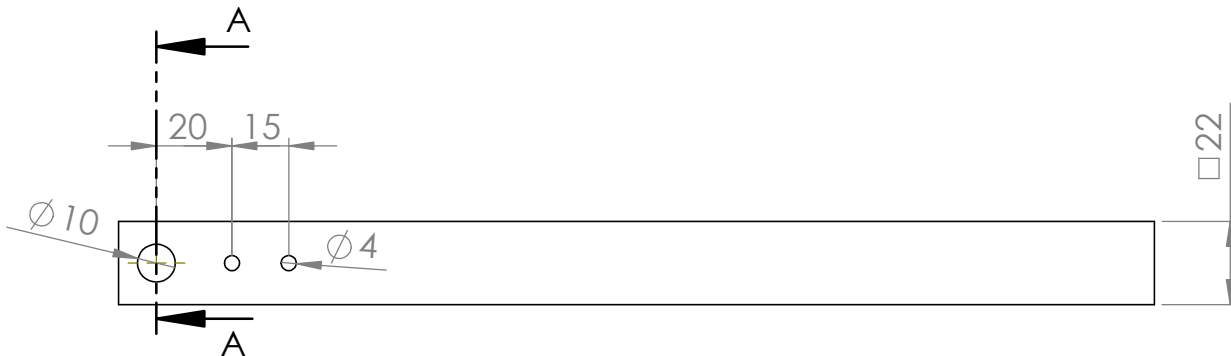
F



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

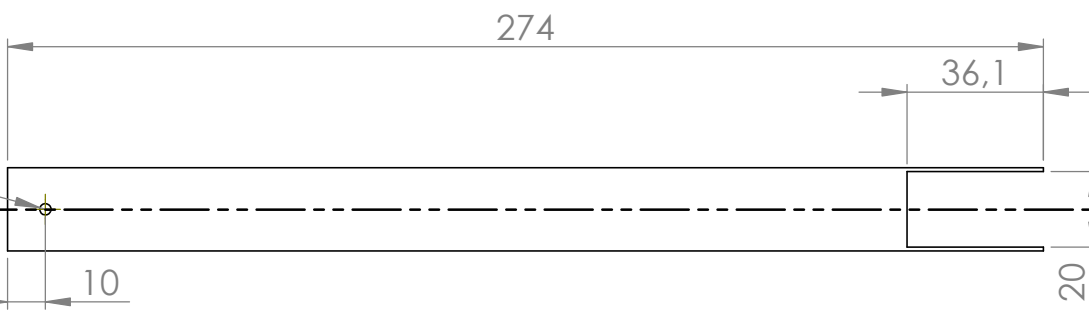
E

E



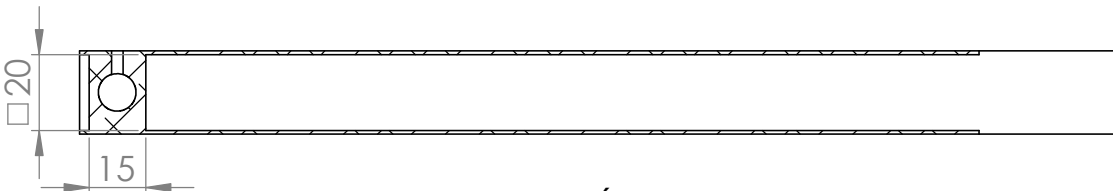
D

D



C

C



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 2

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:	Brazo 2	
N.º DE DIBUJO	Plano 19	A4

Licencia educacional de **SOLIDWORKS**
Sólo para uso académico

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1

3

2

1

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

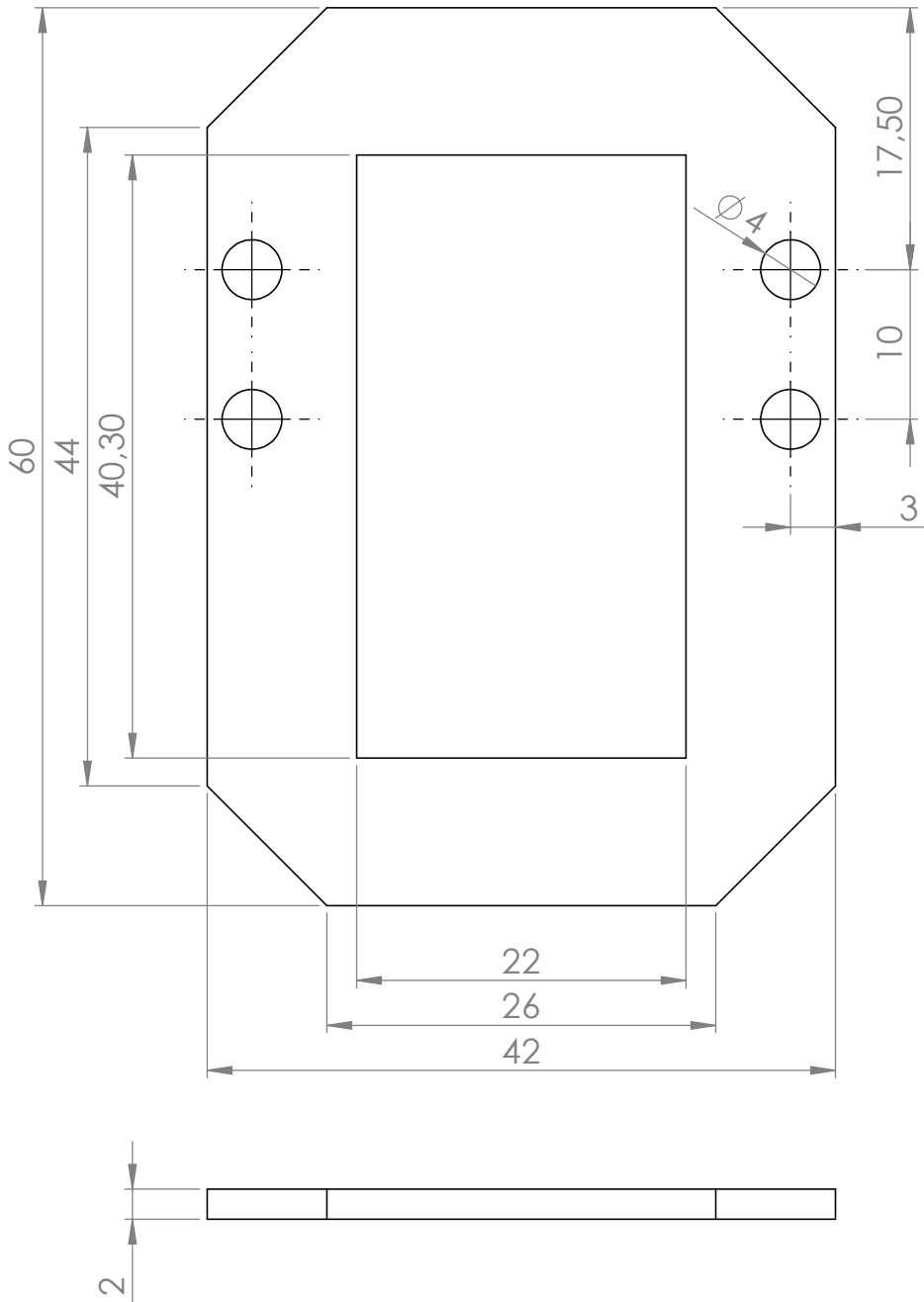
C

B

B

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:
Asiento Futaba 3003

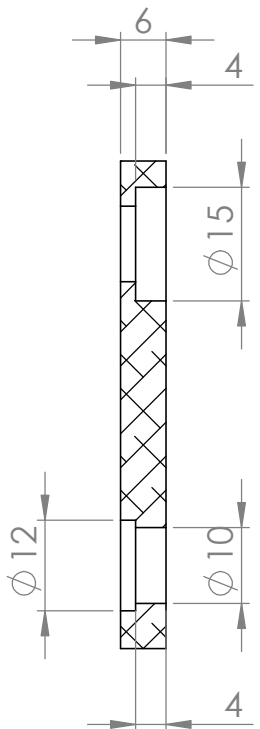
N.º DE DIBUJO
Plano 20

A4

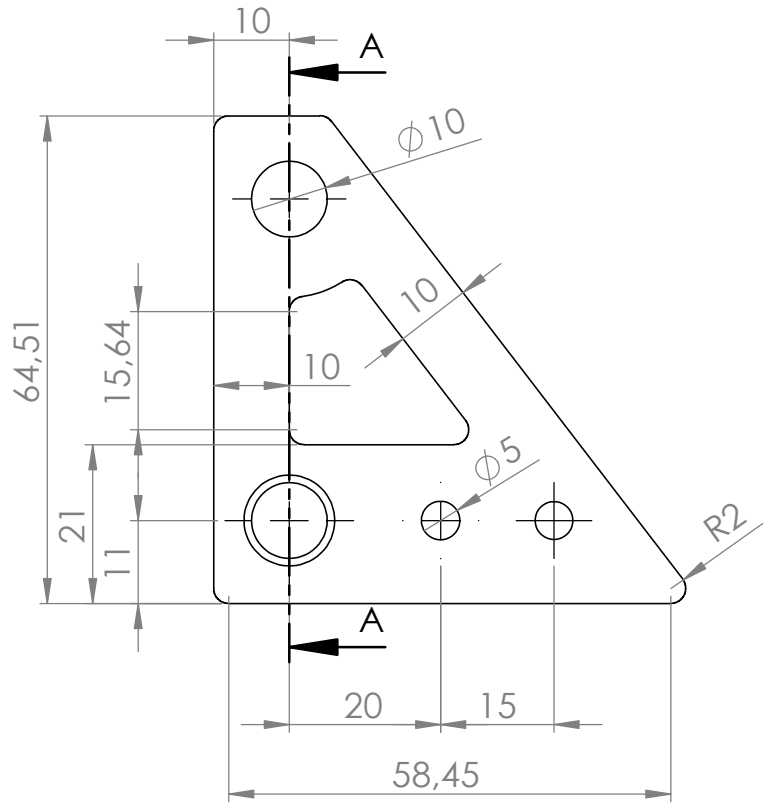
3

2

1



SECCIÓN A-A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Juan Adán Laguna	
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.				Tirante 3	
VERIF.				N.º DE DIBUJO	
APROB.				Plano 21	
FABR.				ESCALA:1:1	
CALID.			MATERIAL:	HOJA 1 DE 1	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

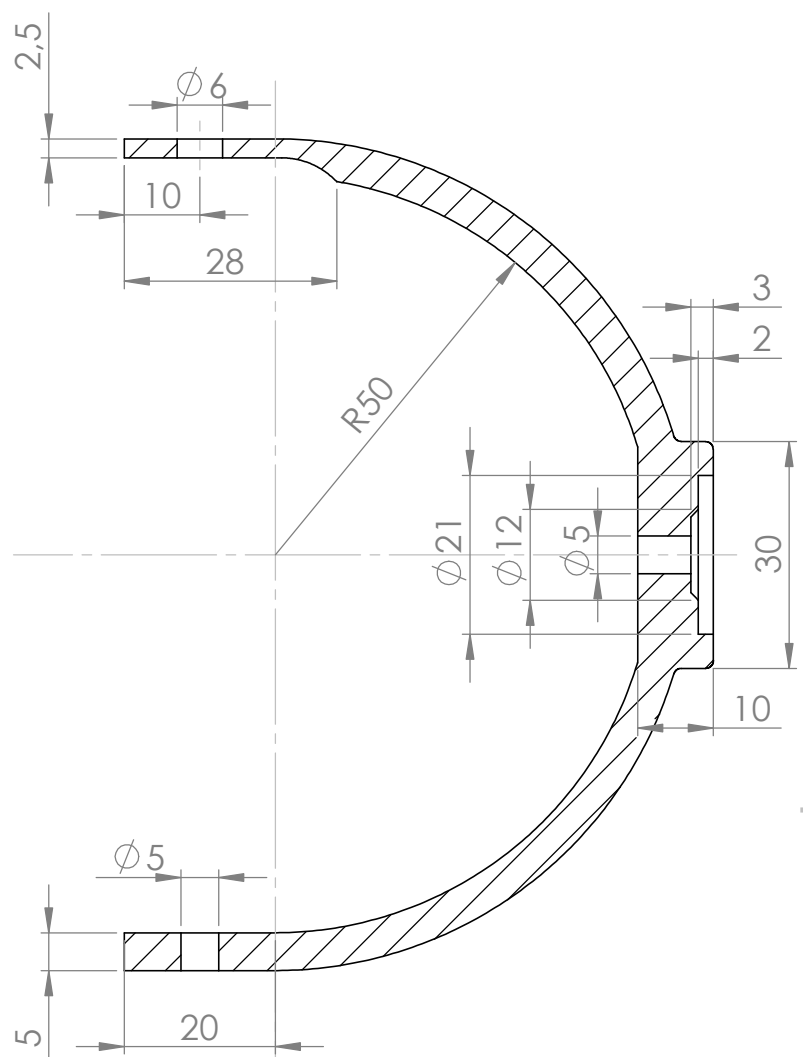
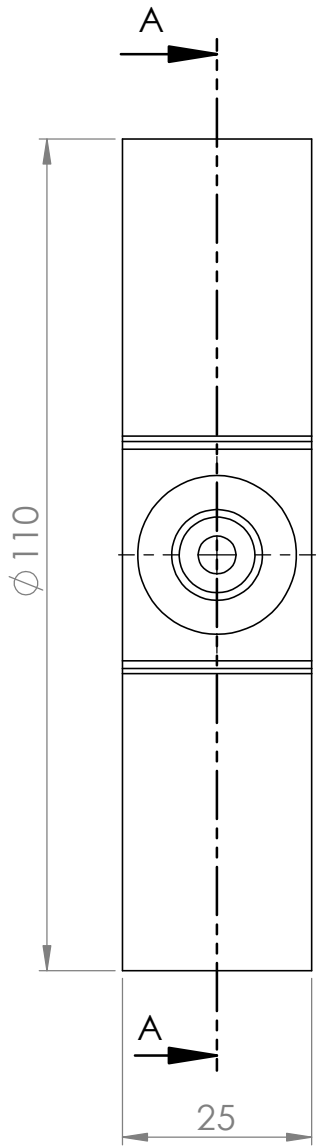
D

C

C

B

B



SECCIÓN A-A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
 Muñeca

N.º DE DIBUJO
 Plano 22

A4

Licencia educacional de **SOLIDWORKS**
 Sólo para uso académico

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

3

2

1

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

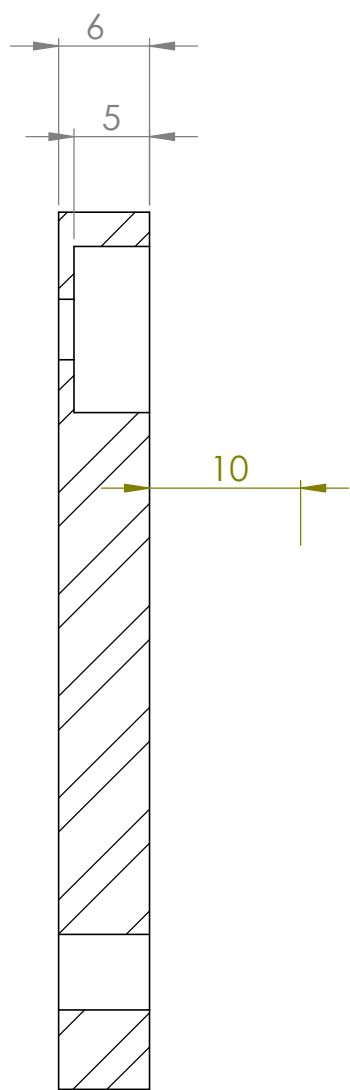
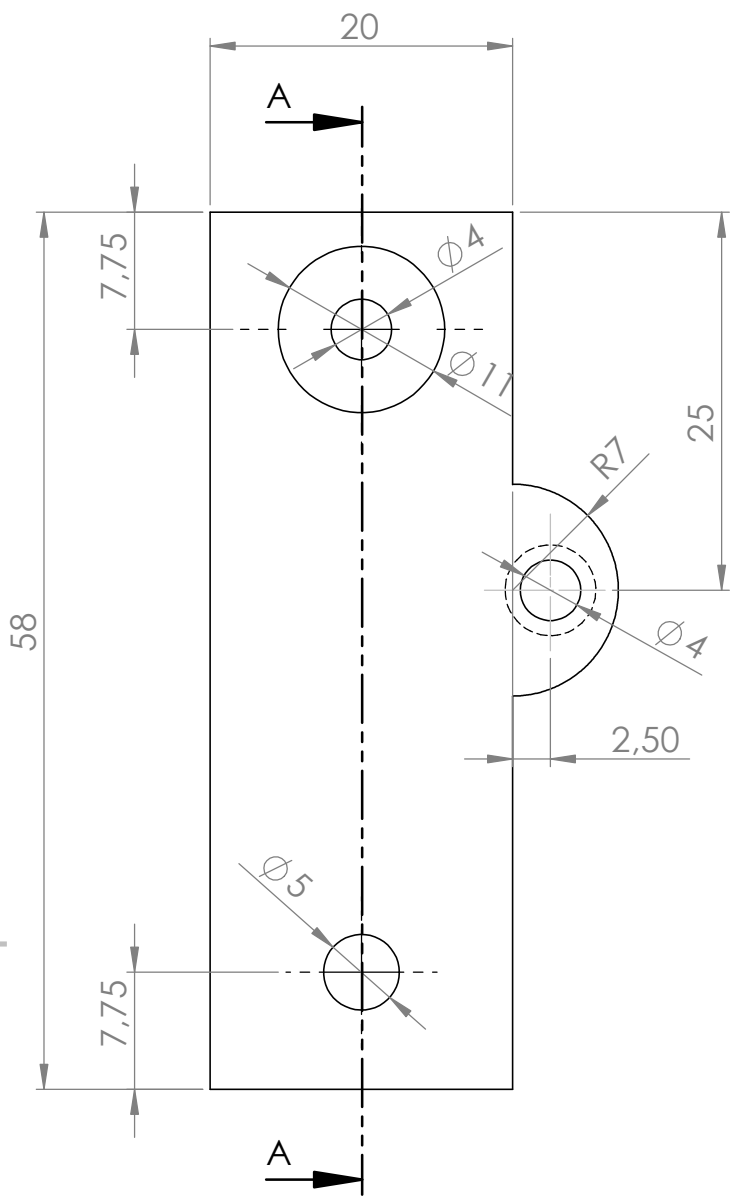
C

B

B

A

A



SECCIÓN A-A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
Tirante 2
N.º DE DIBUJO
Plano 23
A4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

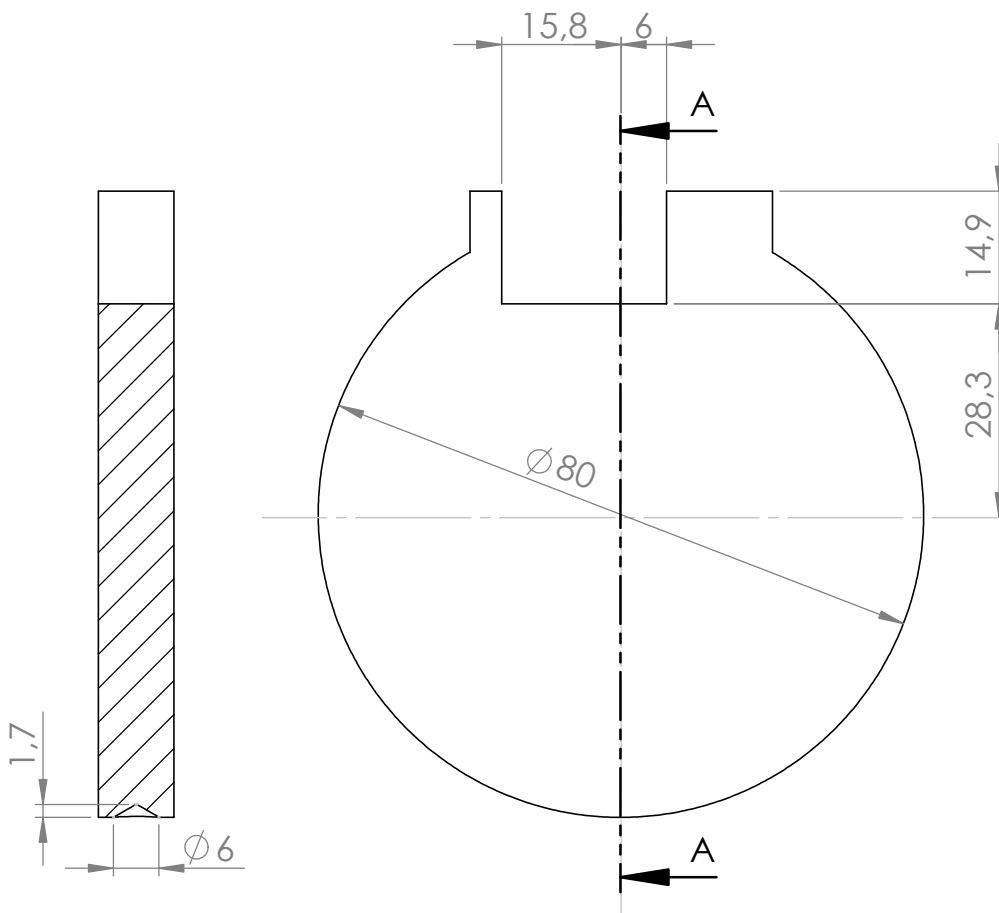
C

B

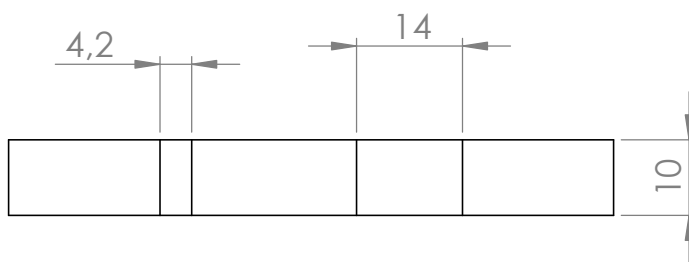
B

A

A



SECCIÓN A-A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

Juan Adán Laguna

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

Pala

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

Plano 24

A4

3

2

1

ANEXO 7. MOTORES. HOJA DE CARACTERÍSTICAS

En las siguientes páginas de este Anexo se incluyen las hojas de características de los Motores Paso a Paso estudiados, así como las de los Servomotores Futaba.

MOTORES
PASO A PASO
SURESTEP™



CAPÍTULO
3

En este capítulo...

Características	3-2
Especificaciones	3-3
Diseño e Instalación	3-3
Fuente de poder y accionamiento	3-4
Montaje del motor	3-4
Conectando el motor	3-4
Diagrama de cableado y cable de extensión	3-4
Curvas de torque vs. velocidad	3-5
Dimensiones	3-7

Características

- Cuatro motores paso a paso estándares para cubrir un amplio rango de aplicaciones
- El estilo cuadrado de la carcasa produce un alto torque y logra una mejor relación de volumen a torque
- Rebordes o bridas de montaje NEMA 17, 23 y 34
- Rangos de torque con el eje detenido desde 83 a 434 onzas-pulgada o 0,59 hasta 3,06 N-m
- Cable del motor con conector, de 12 pulgadas de largo
- Cable de extensión de 20 pies (6 metros) con conector

NEMA 17
STP-MTR-17048



NEMA 23
STP-MTR-23055



NEMA 23
STP-MTR-23079



NEMA 34
STP-MTR-34066



Cable de extensión
STP-EXT-020



Especificaciones

Especificaciones del motor paso a paso <i>SureStep™</i>				
Números de artículo	STP-MTR-17048	STP-MTR-23055	STP-MTR-23079	STP-MTR-34066
Flanje del Motor	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 34
Torque de eje deternido máximo	0,59 N-m	1,29 N-m	2,08 N-m	3,06 N-m
	83 onzas-pulgada	166 onzas-pulgada	276 onzas-pulgada	434 onzas-pulgada
	5,2 libras-pulgada	11,4 libras-pulgada	18,4 libras-pulgada	27,1 libras-pulgada
Inertía del rotor	0,0000068 kg-m ²	0,000027 kg-m ²	0,000047 kg-m ²	0,00014 kg-m ²
	0,45 oz-in ²	1,483 oz-in ²	2,596 oz-in ²	7,66 oz-in ²
	0,00006 lb-in-s ²	0,00024 lb-in-s ²	0,00042 lb-in-s ²	0,0012 lb-in-s ²
Corriente nominal	2,0 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase
Angulo del paso básico	1,8° (motores bifásicos con cable con conector)			
Peso	210 gramos 0,7 lbs	457 gramos 1,50 lbs	1 Kg 2,2 lbs	1,17 Kg 3,85 lbs
Tolerancia del eje	0,0508 mm o 0,002 pulgadas			
Juego radial del eje @ fuerza de 1 libra	0,0254 mm o 0,001 pulgadas máximas			
Perpendicularidad	0,0762 mm o 0,003 pulgadas			
Concentricidad	0,0508 mm o 0,002 pulgadas			
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C (La temperatura externa del motor debe mantenerse abajo de 100 °C (212 °F))			
Fuerza máxima radial	1,82 Kg o 6 lbs	4,57 Kg o 15 lbs	4,57 Kg o 15 lbs	11,89 Kg o 39 lbs
Fuerza máxima axial	1,82 Kg o 6 lbs	3,96 Kg o 13 lbs	3,96 Kg o 13 lbs	7,62 Kg o 25 lbs
Clase de aislación	Clase B 130 °C			
Aprobación de Agencia	CE (cumple con EN55014-1 (1993) y EN60034-1.5.11)			
Cable de extensión (motor al accionamiento)	6 metros o 20 pies - Número de artículo STP-EXT-020			

Diseño e instalación

Permita un tiempo suficiente para acelerar la carga y dimensione el motor paso a paso con un factor de seguridad del 100% del torque.

No desmonte los motores paso a paso porque la eficiencia del motor será reducida y la garantía será anulada.

No conecte ni desconecte el motor paso a paso durante la operación.

Monte el motor a una superficie con buena conductividad térmica, tal como acero o aluminio, para permitir la disipación de calor.

Use un acoplamiento flexible con "abrazaderas" al eje del motor y al eje de la carga para prevenir empuje axial en los cojinetes con pequeños desalineamientos.

Fuente de poder y accionamiento del motor

La fuente de poder STP-PWR-3204 de AutomationDirect es la mejor opción para accionar motores paso a paso de **AUTOMATIONDIRECT** y otros. La fuente de poder STP-PWR-3204 fue diseñada para trabajar con el accionamiento del motor bipolar de **AUTOMATIONDIRECT** *SureStep™* STP-DRV-4035.

Montaje del motor

Se recomienda que el motor esté montado en una superficie metálica para ayudar a disipar el calor generado por el motor. El motor puede tener el eje horizontal o vertical; si es vertical, no debe haber esfuerzo radial en el motor, excepto el peso de su propio rotor.

Conectando el motor

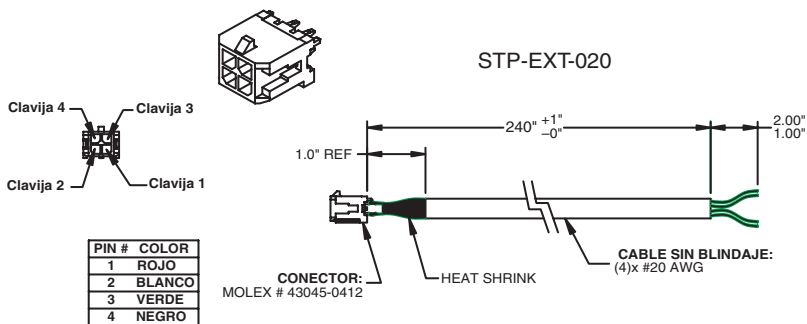


Advertencia: Al conectar un motor paso a paso con un accionamiento o un controlador indexer, asegúrese que la fuente de poder del motor está apagada.

Nunca desconecte el motor mientras que el accionamiento esté energizado.

Nunca conecte los cables del motor a la tierra o directamente a la fuente de poder. (vea el diagrama del cable de extensión de la figura de abajo para el código de color de los conductores del motor paso a paso de los motores suministrados por **AUTOMATIONDIRECT**)

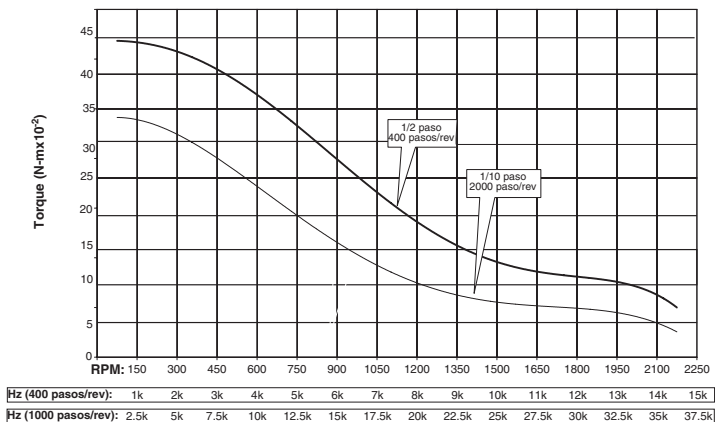
Diagrama del cable de extensión



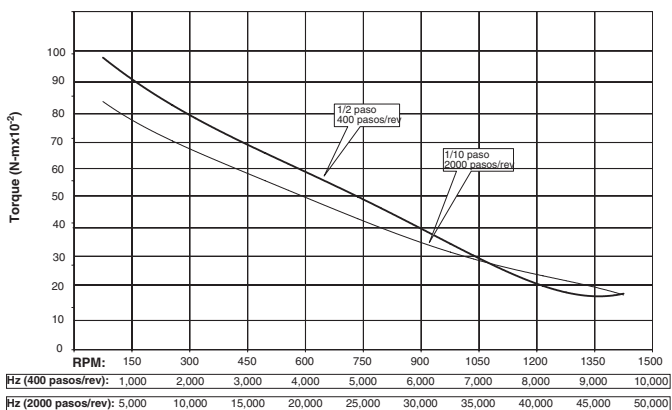
Curvas de torque vs. velocidad

Observe por favor que la curva de torque contra valores de velocidad mostrados fue obtenida al voltaje de entrada nominal de CA usando los motores paso a paso *SureStep*™, la fuente de poder STP-PWR-3204 y un cable inalterado de extensión STP-EXT-020, todos descritos en este manual.

STP-MTR-17048

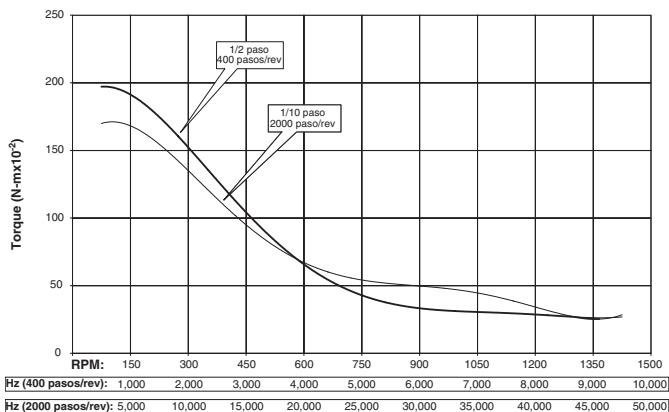


STP-MTR-23055

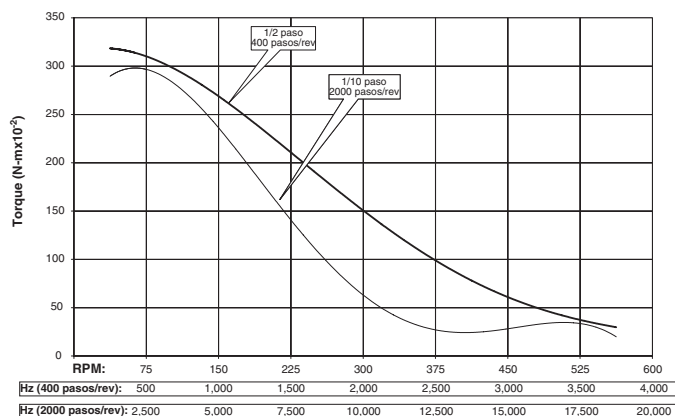


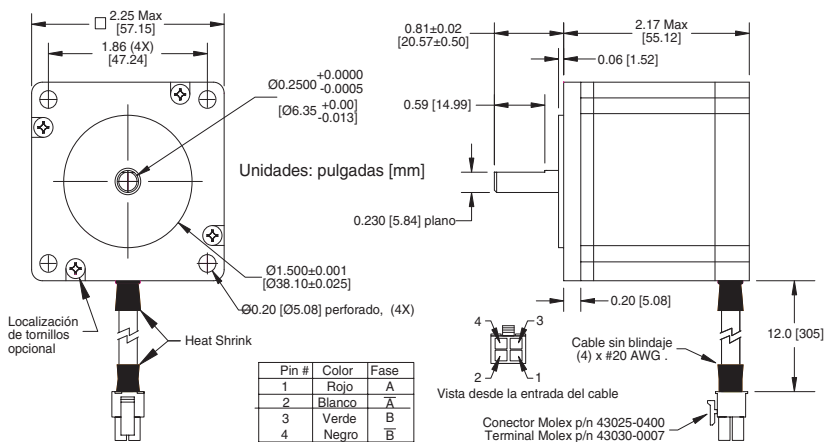
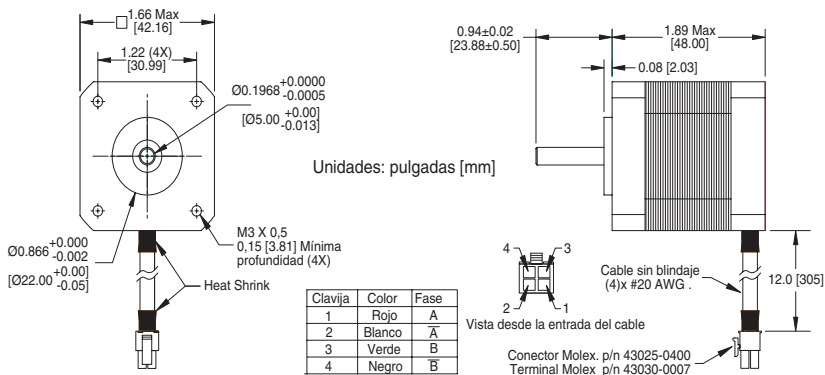
Curvas de torque vs. velocidad (cont)

STP-MTR-23079



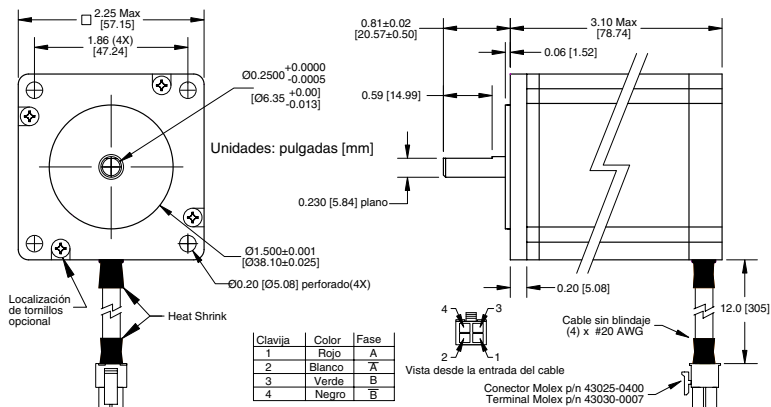
STP-MTR-34066



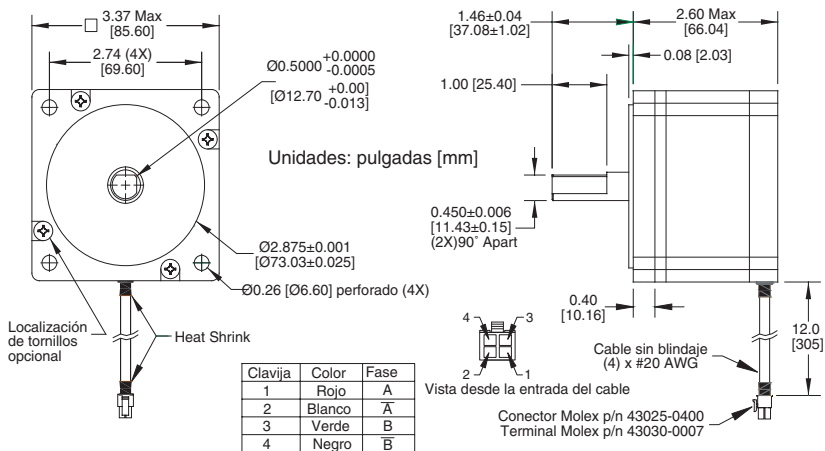


Dimensiones (cont)

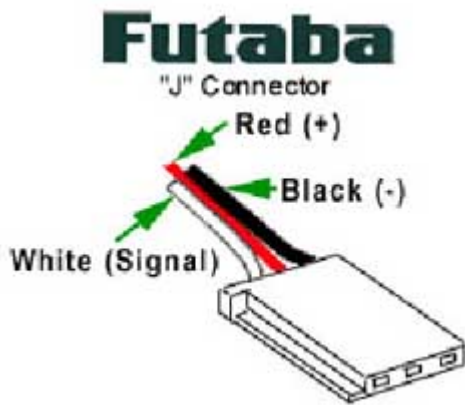
STP-MTR-23079



STP-MTR-34066



S3003 FUTABA SERVO



...S3003 FUTABA SERVO...

Detailed Specifications

Control System:	+Pulse Width Control 1520usec Neutral	Current Drain (4.8V):	7.2mA/idle
Required Pulse:	3-5 Volt Peak to Peak Square Wave	Current Drain (6.0V):	8mA/idle
Operating Voltage:	4.8-6.0 Volts	Direction:	Counter Clockwise/Pulse Traveling 1520-1900usec
Operating Temperature Range:	-20 to +60 Degree C	Motor Type:	3 Pole Ferrite
Operating Speed (4.8V):	0.23sec/60 degrees at no load	Potentiometer Drive:	Indirect Drive
Operating Speed (6.0V):	0.19sec/60 degrees at no load	Bearing Type:	Plastic Bearing
Stall Torque (4.8V):	44 oz/in. (3.2kg.cm)	Gear Type:	All Nylon Gears
Stall Torque (6.0V):	56.8 oz/in. (4.1kg.cm)	Connector Wire Length:	12"
Operating Angle:	45 Deg. one side pulse traveling 400usec	Dimensions:	1.6" x 0.8"x 1.4" (41 x 20 x 36mm)
360 Modifiable:	Yes	Weight:	1.3oz. (37.2g)

Futaba S3111 Micro Servo 6.6g

Stock Number	FUTM0047
Manufacturer Number	S3111
Accessories Needed	Parts Listing



Notes from the Tech Department

This is the Futaba S3111 6.6g Micro Servo with J Connector.

FEATURES: Compact dimensions and light weight is ideal for Park Flyers and small electric aircraft
Replaceable gears

INCLUDES: One Futaba S3111 Micro Servo with J Connector

REQUIRES: Installing in aircraft and connecting to receiver
Servo mounting screws (can look at a local hardware store for a 1.5mm screw or use the Dubro Micro Servo Mount, DUBM6924

SPECS: Dimensions: 0.9 x 0.4 x 0.8" (7/8 x 7/16 x 13/16") (22 x 11 x 20mm)
Weight: 0.22oz (1/4oz) (6.3g)
Output Spline Diameter: 4mm
Speed 0.12 sec/60° @ 4.8V:
Torque: 8.3 oz-in (0.6 kg-cm) @ 4.8V

COMMENTS: This servo cannot be used with gasoline engines or large/middle scale gliders or other models that require much torque.
Use of 6.0V not recommended as this will shorten servo life.
Order DUBM6924 if mounting hardware is needed

For Gear Set, order FUTM3466
For Servo Case Set, order FUTM2952

jxs 10/31/05
lr/jxs
updated jpg 5/10/06