

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO**

# **MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**CONTROL DE POSICIÓN CON 3 GRADOS DE LIBERTAD PARA EL  
SEGUIMIENTO DE LA SUPERFICIE EN INSPECCIÓN SIN CONTACTO  
DE DEFECTOS EN CARROCERÍAS DE AUTOMÓVIL**

**JULIO 2021**

**Yesid Danilo Vargas Neira**

**Ignacio Álvarez García**

**[Firma]**

**[Firma]**



## **RESUMEN**

En el presente documento se describe el diseño de un sistema realizado con la empresa Dsiplus, para controlar la posición de un sensor de distancias por triangulación, a fin de inspeccionar la superficie de carrocerías de automóvil.

En busca de conseguir un sistema robusto y reproducible se desarrolló un módulo con tres grados de libertad, que posiciona al sensor según la geometría de la pieza a inspeccionar. El sistema diseñado permite la comunicación entre un maestro y esclavos (dependiendo de la cantidad de módulos a utilizar), mientras coordina el desplazamiento en el eje Z y rotaciones en los ejes X y Y.

El funcionamiento de este sistema es controlado por la placa de desarrollo Teensy, con ayuda de un módulo de comunicación EtherCAT y un controlador para la interfaz de potencia en los actuadores, que para este caso son motores paso a paso encargados de ejecutar los movimientos del módulo. Para lograr la comunicación entre diferentes módulos, se utiliza un ordenador como maestro bajo una aplicación desarrollada anteriormente por la empresa.

El módulo final consiste en un sistema fijo de desplazamiento lineal en vertical, en cuyo extremo inferior se encuentra el mecanismo que se ocupa de rotar el sensor acoplado, con un margen de operación de 140° para cada uno de los ejes X y Y.

Este módulo constituye la parte elemental de un túnel de inspección, en donde varios módulos estarán fijos a un arco metálico, mientras una banda transportadora movilizara las piezas a ser examinadas. Este sistema pretende ser una solución en la industria, en lo que a controles de calidad respecta, dichos controles que con el pasar de los días se hacen más importantes y rigurosos, donde se es más demandado un control del 100% de la producción, teniendo en cuenta no solo las propiedades dimensionales sino también la detección de defectos internos y superficiales.

Finalmente, el mecanismo diseñado, demuestra un progreso en cuanto a funcionamiento, reproducibilidad en la fabricación del módulo y una notoria reducción de fallas, en comparación con la primera versión del módulo que fue fabricado en la empresa. Adicionalmente, se diseñó una variante de la sección fija del sistema, para dotar de un cuarto grado de libertad al módulo. Se espera concluir la fabricación del módulo en el mes inmediatamente posterior a la presentación de este documento.

## **PALABRAS CLAVE**

Diseño Mecánico - Teensy - Motor paso a paso – EtherCAT - MOSFET



## ÍNDICE GENERAL

INDICE DE LA MEMORIA .....	V
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	XI
MEMORIA .....	XIII



# ÍNDICE DE LA MEMORIA

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.2. VENTAJAS DE ESTE PROYECTO FRENTE A OTROS .....	2
1.3. DISEÑO EXISTENTE.....	3
1.3.1. Desplazamiento en el eje z.....	3
1.3.2. Rotación en el eje Y.....	4
1.3.3. Rotación en el eje X.....	4
1.4. ASPECTOS A MEJORAR.....	5
<b>2. DISEÑO MECÁNICO.....</b>	<b>7</b>
2.1. IDEAS PARA EL EJE X.....	7
2.1.1. Concepto A.....	8
2.1.2. Concepto B.....	8
2.1.3. Selección de ideas.....	9
2.1.4. Selección del motor.....	10
2.1.5. Sujeción.....	11
2.1.6. Selección de reductora.....	11
2.1.7. Microinterruptores.....	12
2.1.8. Ensamble eje X.....	12
2.2. IDEAS PARA EL EJE Y.....	13
2.2.1. Concepto A.....	13
2.2.2. Concepto B.....	13
2.2.3. Selección de ideas.....	14
2.2.4. Selección del motor.....	14
2.2.5. Selección de reductora.....	15
2.2.6. Diseño en detalle .....	15
2.2.6.1. Soporte superior.....	15
2.2.6.2. Soporte de la reductora.....	16
2.2.6.3. Soportes laterales.....	17
2.2.6.4. Rodamiento. ....	17
2.2.6.5. Bulón.....	18
2.2.6.6. Suplemento para el rodamiento .....	18
2.2.6.7. Soporte para microswitches.....	19
2.2.6.8. Microinterruptores.....	19
2.2.6.9. Caja eléctrica.....	19
2.2.6.10. Canaleta.....	20
2.2.7. Ensamble ejes XY.....	20
2.3. IDEAS PARA EL EJE Z.....	20
2.3.1. Concepto A.....	21
2.3.2. Concepto B.....	22
2.3.3. Selección de ideas.....	23
2.3.4. Selección del motor.....	24
2.3.5. Selección de reductora.....	24
2.3.6. Diseño en detalle .....	25
2.3.6.1. Soporte del modulo .....	25
2.3.6.2. Separadores .....	25
2.3.6.3. Cadena portacables .....	26
2.3.6.4. Caja eléctrica.....	26
2.3.6.5. Microinterruptores.....	27
2.3.6. Escuadra de unión .....	27
2.4. ENSAMBLE TOTAL DEL MODULO .....	28
2.4.1. Velocidad de operación .....	30
2.4.2. Peso del modulo.....	31
2.5. ANÁLISIS ESTÁTICO (ENSAYO MEF).....	32
2.5.1. Bulón.....	33
2.5.2. Separadores .....	33

<b>3.</b>	<b>DISEÑO ELECTRÓNICO .....</b>	<b>35</b>
3.1.	TEENSY .....	36
3.2.	CONTROLADOR DRV8711 .....	37
3.3.	TRANSISTORES MOSFET.....	38
3.4.	INTERFAZ DE POTENCIA.....	39
3.4.1.	<i>Tensión umbral del Gate al Source - <math>V_{gs(th)(min)}</math> y <math>V_{gs(th)(máx.)}</math> .....</i>	39
3.4.2.	<i>Resistencia en conducción del Drain al Source - <math>R_{ds(on)}</math>.....</i>	40
3.4.3.	<i>Corriente de drenaje - <math>I_d</math> .....</i>	40
3.4.4.	<i>Tensión en conducción del Drain al Source - <math>V_{ds}</math> .....</i>	40
3.4.5.	<i>Mosfet tipo N.....</i>	40
3.5.	PROTECCIÓN CONTRA POLARIDAD INVERSA CON MOSFET TIPO P.....	41
3.6.	LAYOUT DEL CIRCUITO ELÉCTRICO .....	42
3.7.	DISEÑO DE LA PCB .....	47
<b>4.</b>	<b>PROGRAMACIÓN .....</b>	<b>51</b>
4.1.	COMUNICACIÓN SPI.....	52
4.2.	LIBRERÍA HIGH POWER STEPPER .....	52
4.2.1.1.	<i>Decay mode.....</i>	52
4.3.	CONTROL DE MOTORES PASO A PASO.....	53
4.3.1.	<i>Microstepping .....</i>	53
4.4.	TEENSYDUINO .....	55
4.4.1.	<i>Librería Accelstepper .....</i>	56
4.4.2.	<i>Función yield .....</i>	56
4.4.3.	<i>Teensystep.....</i>	57
4.5.	ETHERCAT .....	57
4.5.1.	<i>Easycat.....</i>	58
4.6.	PRUEBAS .....	58
<b>5.</b>	<b>PROPUESTA ADICIONAL .....</b>	<b>61</b>
5.1.	CONCEPTO MECÁNICO .....	61
5.1.1.	<i>Soporte móvil del módulo .....</i>	61
5.1.2.	<i>Sistema de transmisión Nexen .....</i>	61
5.1.3.	<i>Soporte para el motor del cuarto eje .....</i>	62
5.1.4.	<i>Guías lineales .....</i>	63
5.1.5.	<i>Selección del motor.....</i>	64
5.1.6.	<i>Selección de reductora.....</i>	64
5.1.7.	<i>Ensamble del módulo con soporte móvil .....</i>	65
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>67</b>
<b>7.</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>69</b>
7.1.	PRESUPUESTO DE INGENIERÍA .....	69
7.2.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO .....	69
7.2.1.	<i>Gastos en componentes comerciales.....</i>	69
7.2.2.	<i>Gastos de fabricación mecánica .....</i>	70
7.2.3.	<i>Gastos de fabricación electrónica .....</i>	71
7.3.	COSTO TOTAL DEL PROYECTO .....	71
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>77</b>



<b>ANEXO 1</b> .....	79
<b>ANEXO 2</b> .....	103
<b>ANEXO 3</b> .....	105
<b>ANEXO 4</b> .....	107
<b>ANEXO 5</b> .....	112



**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1. Túnel de inspección.....	1
Figura 1.2. Subsistema eje Z.....	3
Figura 1.3. Subsistema eje Z con gabinete eléctrico.....	4
Figura 1.4. Subsistema eje Y.....	4
Figura 1.5. Subsistema eje X.....	5
Figura 2.1. Esquema general.....	7
Figura 2.2. Sujeción del sensor y el motor.....	8
Figura 2.3. Eje X - Concepto A.....	8
Figura 2.4. Eje X - Concepto B.....	9
Figura 2.5. Rotación en X.....	9
Figura 2.6. Reductora Planetaria PD053 [3].....	11
Figura 2.7. Microinterruptor con palanca de rodillo [4].....	12
Figura 2.8. Ensamble del eje X.....	12
Figura 2.9. Eje Y - Concepto A.....	13
Figura 2.10. Eje Y - Concepto B.....	14
Figura 2.11. Soporte superior.....	16
Figura 2.12. Detalle de soporte superior para girar el sistema XY.....	16
Figura 2.13. Soporte reductora eje Y.....	17
Figura 2.14. Soportes laterales para el eje Y.....	17
Figura 2.15. Rodamiento eje Y [6].....	18
Figura 2.16. Bulón eje Y.....	18
Figura 2.17. Soporte Rodamiento.....	18
Figura 2.18. Soporte Microswitches.....	19
Figura 2.19. Microinterruptor activado por plunger [7].....	19
Figura 2.20. Caja eléctrica ejes XY [8].....	19
Figura 2.21. Canaleta [9].....	20
Figura 2.22. Ensamble ejes XY.....	20
Figura 2.23. Unidad lineal UNIMOTION [10].....	21
Figura 2.24. Sujeción sistema actual.....	21
Figura 2.25. Sujeción para el nuevo sistema.....	22
Figura 2.26. Elevador mecánico por cremallera LIFGO [11].....	22
Figura 2.27. Sujeción sistema Lifgo.....	23
Figura 2.28. Reductora planetaria PEIIR070 [13].....	25
Figura 2.29. Soporte del módulo.....	25
Figura 2.30. Separadores caja eléctrica.....	26
Figura 2.31. Cadena portacables IGUS [14].....	26
Figura 2.32. Caja eléctrica Rittal [15].....	27
Figura 2.33. Microinterruptor con palanca articulada [16].....	27
Figura 2.34. Escuadra unión.....	27
Figura 2.35. Modulo completo.....	28
Figura 2.36. Túnel de inspección con módulos rediseñados.....	29
Figura 2.37. Restricciones y fuerzas en el bulón.....	33
Figura 2.38. Resultados análisis MEF bulón.....	33
Figura 2.39. Resultados análisis MEF separadores.....	34
Figura 3.1. Diagrama electrónico del modulo.....	35
Figura 3.2. Teensy 3.6 vs Teensy 4.1.....	36
Figura 3.3. Teensy 4.1 [17].....	36
Figura 3.4. Layout Teensy.....	37
Figura 3.5. Configuración de pines DRV8711 [18].....	38
Figura 3.6. Símbolos de los MOSFET [19].....	39

Figura 3.7. Aplicación de MOSFET como interruptor de potencia [19].	39
Figura 3.8. Valores lógicos de ejemplo para la activación del MOSFET [20].	40
Figura 3.9. Valores Rds(on) de ejemplo en la activación del MOSFET [20].	40
Figura 3.10. Circuito de protección de polaridad inversa [22].	41
Figura 3.11. Esquema de conexión para el controlador de los motores. [23].	43
Figura 3.12. Esquemático de aplicación típica según T.I. [23].	44
Figura 3.13. Layout DRV8711.	45
Figura 3.14. Protección de polaridad inversa para el controlador	45
Figura 3.15. Puente H con MOSFETs.	46
Figura 3.16. Conectores del circuito impreso.	46
Figura 3.17. Esquema de pistas.	47
Figura 3.18. Cara superior de la PCB.	50
Figura 3.19. Cara inferior de la PCB.	50
Figura 4.1. Diagrama de flujo del programa.	51
Figura 4.2. Comunicación SPI entre un maestro y un esclavo [24].	52
Figura 4.3. Modos de decaimiento [23].	53
Figura 4.4. Corriente con control de microsteps [23].	54
Figura 4.5. Teensy loader.	56
Figura 4.6. Principio funcional Ethercat.	58
Figura 5.1. Soporte módulo móvil.	61
Figura 5.2. Sistema piñón de rodillo y cremallera.	62
Figura 5.3. Soporte motor cuarto eje.	63
Figura 5.4. Soporte móvil del módulo ensamblado con el actuador.	63
Figura 5.5. Ensamble con guías lineales.	63
Figura 5.6. Módulo con soporte móvil.	65
Figura 6.1. Módulo antiguo Vs Módulo nuevo.	68

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 2.1. Selección de concepto para el Eje X.....	9
Tabla 2.2. Selección del Motor para el eje X.....	10
Tabla 2.3. Datos técnicos del motor eje X [2] .....	11
Tabla 2.4. Datos técnicos de la reductora en el eje X.....	11
Tabla 2.5. Selección de concepto para el Eje Y .....	14
Tabla 2.6. Datos técnicos del motor eje Y [5]. .....	15
Tabla 2.7. Datos técnicos de la reductora en el eje Y [3]. .....	15
Tabla 2.8. Características de la correa y la polea [10]. .....	22
Tabla 2.9. Características técnicas elevador mecánico [11]. .....	23
Tabla 2.10. Selección de concepto para el Eje Z .....	23
Tabla 2.11. Datos técnicos del motor eje Z [12]......	24
Tabla 2.12. Datos técnicos de la reductora en el eje Y [13] .....	25
Tabla 2.13. Características caja eléctrica RITTAL [15] .....	26
Tabla 2.14. Tornillería módulo de inspección .....	30
Tabla 2.15. Peso de chapa del modulo.....	31
Tabla 2.16. Peso de los componentes comerciales .....	32
Tabla 2.17. Peso total del módulo de inspección.....	32
Tabla 2.18. Peso total del módulo anterior .....	32
Tabla 3.1. Pines para el control de los motores .....	37
Tabla 3.2. Características MOSFET DMTH6016LSD.....	41
Tabla 3.3. Características MOSFET DMP6023LE-13 .....	42
Tabla 3.4. Descripción de pines. ....	49
Tabla 4.1. Torque incremental por microsteps en cada motor.....	55
Tabla 4.2. Microsteps necesarios para cada eje. ....	55
Tabla 4.3. Pruebas realizadas.....	59
Tabla 5.1. Datos técnicos de la reductora del cuarto eje [3]. .....	64



## **MEMORIA**





# 1. INTRODUCCIÓN

Este es un proyecto que se lleva a cabo en la empresa Dsiplus, cuya área de trabajo se encuentra especializada en el desarrollo e integración de herramientas automáticas para la mejora de la calidad y la productividad en instalaciones industriales. Dentro de la línea de productos que maneja la empresa, se encuentra en desarrollo un sistema modular de detección de defectos sin contacto en piezas elaboradas para la industria automotriz, del cual se cuenta con una primera versión de un sistema mecatrónico con tres grados de libertad para el control de posición de un sensor, que realizará el seguimiento de la superficie en inspección.

El control de calidad y la supervisión on-line de los productos y procesos industriales son puntos clave para el aumento de competitividad de las empresas productoras. La introducción de sensores modernos (imagen, medidores 3D, vibraciones, termografía) y de herramientas informáticas avanzadas, permiten integrar en su proceso tanto el control de la calidad del 100% de la producción (ausencia de defectos, cumplimiento de tolerancias dimensionales, etc.) como la reducción de costes por funcionamiento anormal (reducción de tiempos de arranque, diagnóstico y prevención de fallos, cambios de consigna, detección de desviaciones del estado del proceso, etc.).

Para esto, la empresa Dsiplus ha creado de un túnel de inspección de superficies de carrocerías de automóvil, utilizando un sistema modular de tres grados de libertad. Este túnel constará de varios de módulos de inspección, cuya cantidad dependerá de los requerimientos solicitados por el cliente, mientras que cada módulo contará con una configuración estándar. El funcionamiento consiste en varios módulos acoplados a un arco metálico, sobre una banda transportadora que desplazara las piezas a ser inspeccionadas, cada módulo moverá y adaptara el sensor de distancias a la posición más óptima para realizar el análisis de las piezas transportadas.

Este sistema de inspección emplea un sensor laser de distancias, eliminando así el contacto entre la pieza de trabajo y la herramienta de medición, lo que proporciona diversas ventajas frente a otros sistemas que hacen uso de elementos de contacto para la medición.

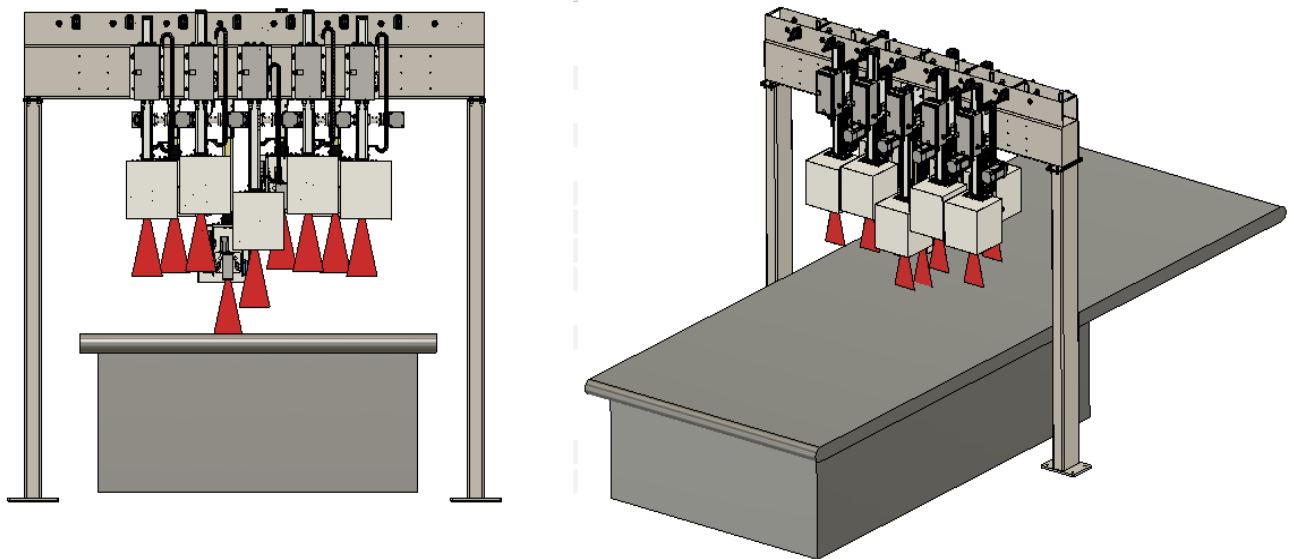


Figura 1.1. Túnel de inspección.

## **1.1. Objetivos**

El objetivo principal del presente proyecto consiste en mejorar el diseño electro-mecánico de una versión inicial de un sistema mecatrónico, que permite adaptar en tiempo real la posición de un sensor de distancias por triangulación a las zonas a inspeccionar de una pieza de carrocería o piel de un automóvil.

El sistema diseñado debe permitir el desplazamiento en el eje Z y rotaciones en los ejes X e Y. Adicionalmente, las mejoras en el diseño mecánico deben poder facilitar la producción en serie, garantizar robustez y simplificar las labores de mantenimiento.

## **1.2. Ventajas de este proyecto frente a otros**

Hasta hace algún tiempo los controles de calidad eran realizados de forma estadística, este proceso era realizado mediante muestras aleatorias de la producción y llevando a cabo sobre estas los correspondientes sondeos e inspecciones. A causa del creciente incremento en las necesidades de controles de calidad en los entornos industriales, se hacía necesario el desarrollo de nuevas técnicas y sensores para llevar a cabo dichos controles de calidad. Esto se debió a que estos procesos de inspección solían ser lentos y tediosos, por ende, al tratar de llevar a cabo una verificación en la totalidad de la producción, se tornaba un trabajo prácticamente imposible de realizar sin que este influyese en la velocidad del proceso productivo con su consecuente impacto económico.

Este problema se hace evidente, principalmente, en los métodos de inspección que requieren un contacto entre el instrumento medidor y la muestra que está siendo estudiada, ya que, en primera instancia el elemento sensor debe realizar una aproximación relativamente lenta para evitar colisiones que pudiesen averiarlo, igualmente, es necesario que no existan vibraciones para realizar medidas de elevada resolución, condición que muy difícilmente podrá ser conseguida en un proceso real.

Un caso de ejemplo puede ser visto en los equipos de medida de rugosidad y ondulación utilizados en la industria. Estos equipos, habitualmente, utilizan una cabeza palpadora, generalmente conocida como Stylus, utilizada para recorrer la superficie en estudio. El proceso es considerablemente demorado, debido a que se debe realizar una aproximación del sensor a la superficie y aplicar una fuerza controlada y limitada, de no hacerlo así, se podría alterar la superficie o estropear el palpador, mientras que de ser aplicada una fuerza muy reducida los defectos más pequeños podrían pasar desapercibidos, en cualquiera de los dos casos las medidas serían incorrectas. Después de haber establecido el contacto, la muestra o el sensor, deben desplazarse el uno respecto del otro, lo que limita la velocidad para evitar que inercias en los movimientos puedan realizar un filtrado paso bajo de la superficie explorada. Como se puede inferir este proceso no es viable si se pretende incorporar a una línea de producción.

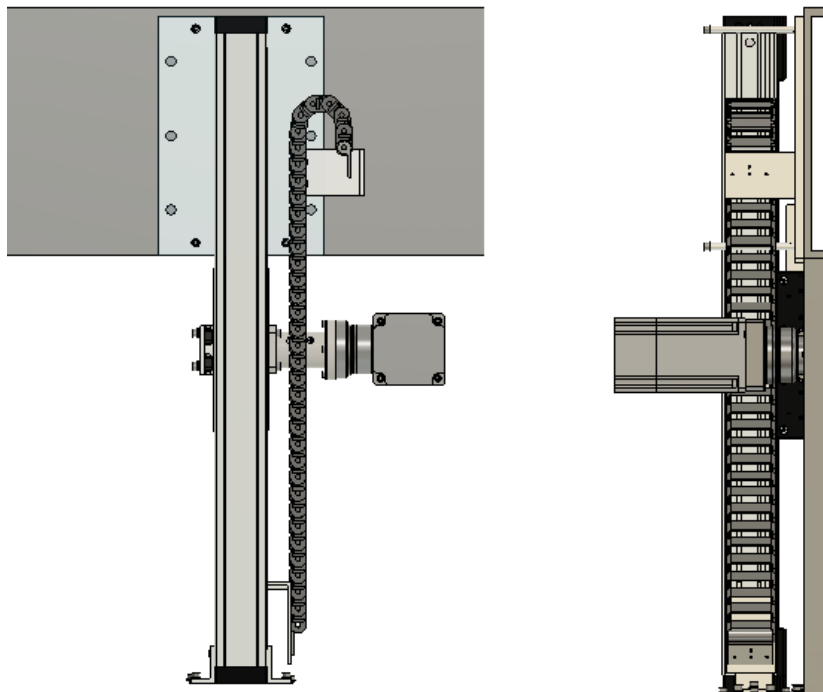
Con la aparición de los sistemas de medición sin contacto, como la visión artificial o los ultrasonidos, las limitaciones de velocidad mencionadas anteriormente desaparecen con lo que se puede realizar una inspección completa de la producción, ayudando así a mejorar los procesos productivos, disminuyendo costos de fabricación y ofreciendo al cliente un producto de mejor calidad y más competitivo [1].

### **1.3. Diseño existente**

Para describir el prototipo inicial con el que se contaba, a continuación, se dividirá el mecanismo en subsistemas según su eje de movimiento e incluyendo también los elementos involucrados en las secciones de dicho subsistema.

#### **1.3.1. DESPLAZAMIENTO EN EL EJE Z**

En este subsistema se encuentra un módulo lineal con correa de transmisión para realizar el desplazamiento por el eje z acompañado de un motor NEMA 34, una reductora de engranajes planetarios de una etapa con relación 1:3 y un acoplamiento con campana para realizar la fijación del actuador al módulo lineal. Junto al módulo se localiza una chapa donde están ubicados los correspondientes microswitches para delimitar el recorrido total del eje Z.



*Figura 1.2. Subsistema eje Z.*

En esta parte del prototipo es donde se encuentra el gabinete eléctrico, se hace uso de una cadena portacables para facilitar el recorrido de los cables desde los demás subsistemas, en los extremos superior e inferior se utilizan unas pequeñas piezas metálicas que fueron diseñadas para mantener fija la cadena a la chapa base donde se apoya todo el sistema y al módulo lineal respectivamente.

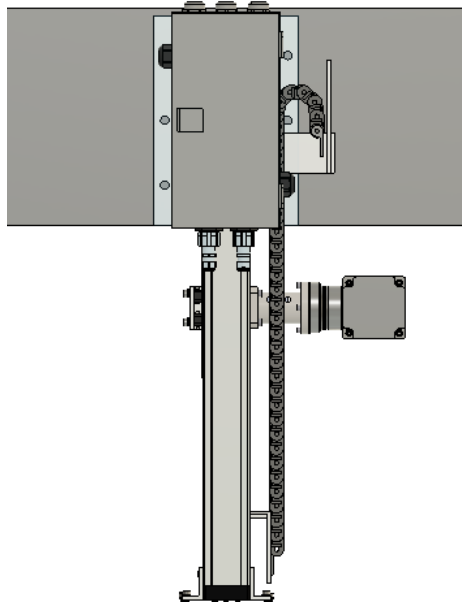


Figura 1.3. Subsistema eje Z con gabinete eléctrico.

### 1.3.2. ROTACIÓN EN EL EJE Y

Para realizar los movimientos de rotación en el eje Y, este subsistema cuenta con un motor NEMA 24 acoplado con un reductor sinfín corona con una relación 1:18, hace uso de diferentes piezas mecanizadas para sujetarlos y también cuenta con un rodamiento de carcasa, cuya finalidad es de soportar y mantener alineado el subsistema del eje X donde se sitúa el sensor de inspección. También se ubica una pequeña caja eléctrica sobre el rodamiento donde se organizan las conexiones de los microswitches de los subsistemas X y Y, para ello se hicieron agujeros en los bastidores laterales, pensando que sería más cómodo introducir los cables por dichos agujeros. En este apartado se incluyeron piezas mecanizadas de chapa metálica y una carcasa para proteger al sensor.

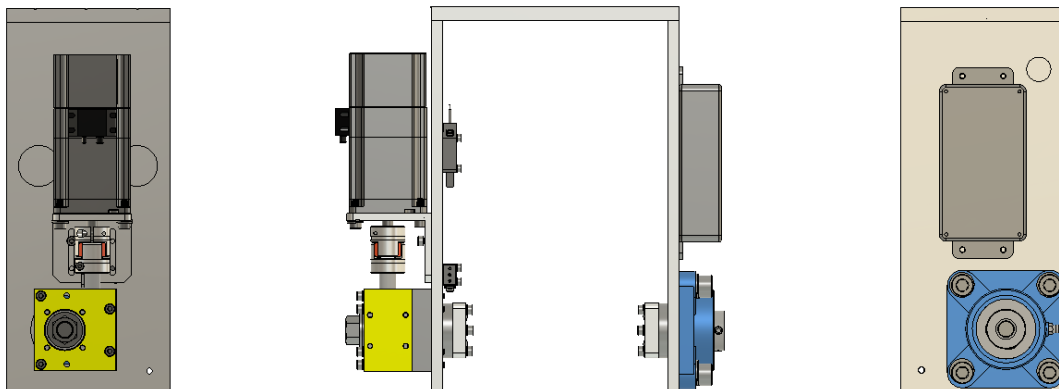


Figura 1.4. Subsistema eje Y.

### 1.3.3. ROTACIÓN EN EL EJE X

La rotación sobre el eje X, al igual que en el subsistema anterior se logra con un motor y el mismo reductor sinfín corona, con la diferencia de que en este caso se emplea un motor NEMA 17. En ambos casos, la rotación en los ejes X y Y presenta un juego de torsión de más de 60 arcmin introducido al sistema por las reductoras.

Para realizar el ensamble del sensor al actuador, se mecanizó un eje metálico que se encuentra fijo desde el reductor hasta la pieza de chapa donde se fija el sensor. En este diseño también se observan orificios hechos sobre la chapa donde se instala el motor, pensados con la misma finalidad de facilitar el paso de cables.

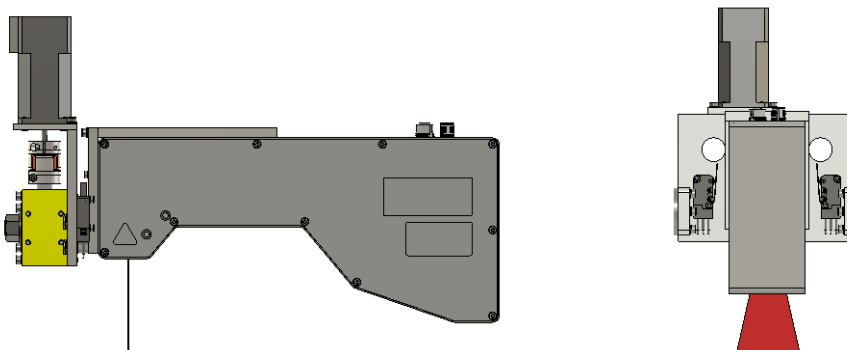


Figura 1.5. Subsistema eje X.

#### 1.4. Aspectos a mejorar

Una vez el modelo existente ha sido estudiado en detalle, se prosiguió a analizar y buscar los problemas relacionados con el diseño y funcionamiento actual de este prototipo.

A continuación, se exponen las fallas detectadas en el diseño actual y posibles puntos a mejorar.

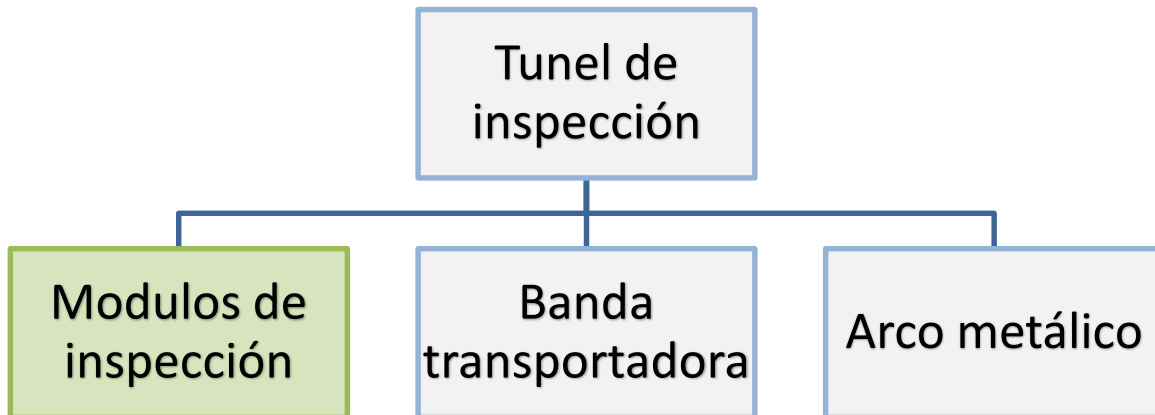
- ✓ El sistema presenta numerosas vibraciones mientras se realiza el desplazamiento sobre el eje Z, lo que deriva en mediciones imprecisas y tiempos de ejecución lentos para minimizar dichas perturbaciones.
- ✓ El método de sujeción de los actuadores al sensor y los elementos de transmisión mecánica introducen juego angular en los ejes de rotación X y Y, estos juegos también influyen negativamente cuando se realizan desplazamientos en el eje Z, incluso si no se ejecutan rotaciones.
- ✓ La velocidad actual de operación es de 120 mm/s para el eje Z y de 60°/s para los ejes X y Y, estos valores son considerados bajos y se espera poder incrementarlos.
- ✓ El margen de visibilidad del sensor se encuentra disminuido por un rango de rotación limitado, siendo 30° máximo de variación en el eje x y 40° para el eje Y.
- ✓ En la cadena Portacables se encuentra un reducido espacio y radio de curvatura para la movilidad de los cables, lo que hace que la cadena no mantenga una posición firme y la vida útil de los cables se disminuya.
- ✓ La actual disposición de los cables a través de la chapa metálica resulta contraproducente al momento de realizar labores de mantenimiento al módulo.
- ✓ El gabinete eléctrico cuenta con un espacio reducido para realizar el montaje electrónico con facilidad y comodidad.
- ✓ Ante una eventual escases de los controladores para los motores, se plantea la posibilidad de encontrar una alternativa para estos, además también se han encontrado problemas en la comunicación con el controlador principal y la presencia de ruido eléctrico.
- ✓ Se considera la posibilidad de reducir el peso actual del módulo.



## 2. DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se describirá todo lo relacionado con el diseño, elección y fabricación de los componentes que forman el mecanismo del módulo de inspección.

El diseño se efectuará con base a lo expuesto en este documento en los apartados anteriores. Se comenzará diseñando los sistemas de rotación en los ejes X y Y, posteriormente se integrará el sistema diseñado a la solución propuesta para el sistema de translación en el eje Z y finalmente se concluirá con los elementos restantes.



*Figura 2.1. Esquema general.*

En el anterior esquema general se observa la composición estándar del túnel de inspección, el presente trabajo se enfocará en los módulos de inspección, mientras que la banda transportadora y el arco metálico, deberán ser diseñados acorde a las necesidades de las piezas a analizar.

Para la fabricación de las piezas diseñadas se tomará el aluminio, ya que es un metal con excelentes propiedades tecnológicas. Su ligereza y su resistencia mecánica, lo convierten en un material ideal para esta aplicación. Una vez el diseño se encuentre terminado, se realizarán análisis estáticos (mediante el método de elementos finitos) a los componentes adecuados con el fin de realizar una validación final del modelo. El diseño mecánico y validación serán realizados en su totalidad usando el software CAD Fusion 360.

### **2.1. Ideas para el eje X**

El punto de partida del diseño mecánico para este proyecto, fue desde del eje de movimiento más cercano al sensor de inspección. Partiendo de esta posición, se realizó un esbozo de las piezas de sujeción del sensor a una parte que más tarde se movería para lograr la rotación en el eje X. Para esto, se tuvieron en cuenta diversas alternativas, por ejemplo, el uso de diferentes motores, mecanismos de transmisión, acoples, etc. Finalmente, la mayoría de propuestas fueron descartadas y se continuo con los modelos que serán enseñados a continuación. A efectos de diseño, para ambos conceptos fueron utilizados motores NEMA 23, sin tener en cuenta sus características.

### 2.1.1. CONCEPTO A

El primer diseño que se propone consiste de dos piezas de chapa metálica que irán fijadas tanto al sensor como al motor, mientras se dispone de una tercera en donde el eje del motor estará fijo. Es decir, el eje del motor permanecería estático mientras el cuerpo del motor gira junto con el sensor, ya que estos dos estarán sujetos por las mismas piezas. Cabe aclarar que se cuenta con una distancia entre la pieza que sujeta el motor y la que sujeta el eje del motor.

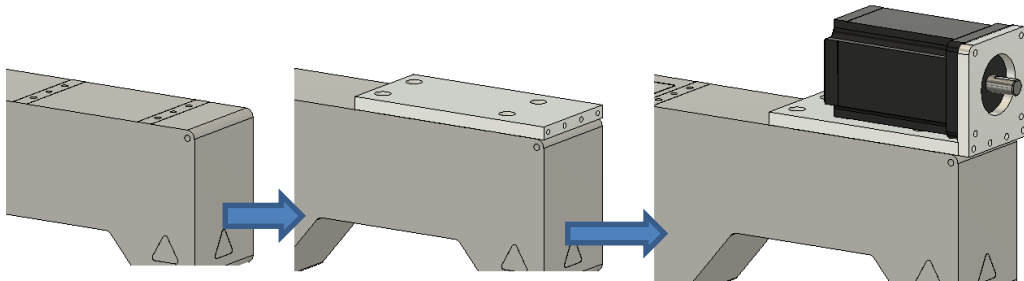


Figura 2.2. Sujeción del sensor y el motor.

En la figura 2.1 se aprecian las piezas diseñadas para sujetar al sensor y mantenerlo unido junto al motor, mientras que este último se encuentra con su eje libre para ser fijado en la chapa donde permanecerá estático. A continuación, se visualiza el concepto completo para realizar la rotación en X, a este diseño se le suman dos pequeñas partes que sería de donde se sujeta el sistema para ser acoplado al mecanismo del eje Y. En este caso se presentarían limitaciones en cuanto a la rotación, ya que el sistema colisionaría cuando se gire más de  $45^\circ$  en cualquier sentido.

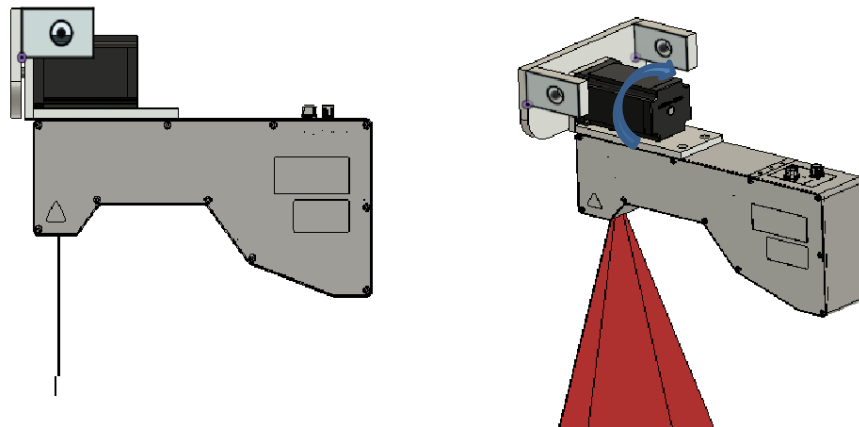


Figura 2.3. Eje X - Concepto A.

### 2.1.2. CONCEPTO B

En este concepto, al igual que el anterior se hace uso de dos piezas de chapa metálica para sujetar al sensor, pero en este caso el cuerpo del motor si permanecerá fijado a una tercera pieza metálica, mientras su eje se conectará con la pieza que sujeta al sensor para así lograr la rotación de este. En el presente concepto, la posición del motor fue intencionalmente situada para que la distancia perpendicular del eje del motor al centro de gravedad del sensor con las piezas de chapa fuese la mínima posible, esto para que el torque necesario sea menor al momento de elegir los actuadores.



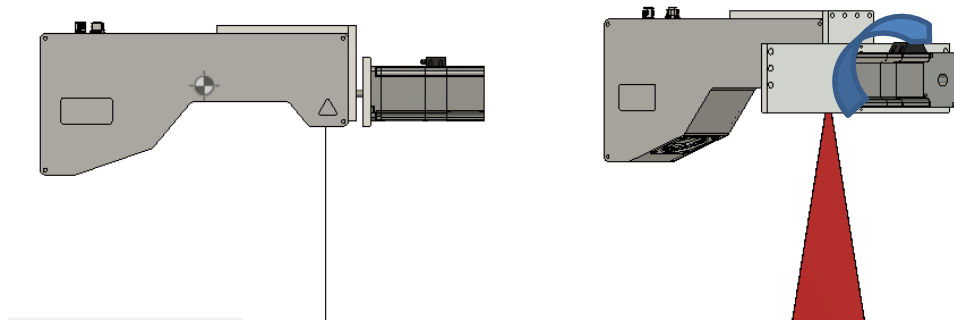


Figura 2.4. Eje X - Concepto B.

Las piezas se diseñan para que sean coincidentes con los agujeros roscados del sensor y con los del motor, mientras que la chapa donde se fija el motor cuenta con las dimensiones suficientes para que el sensor gire sin desbordar la longitud de esta, ya que se tiene previsto sujetar esta parte del sistema por los extremos laterales para insertarla dentro del mecanismo que logrará la rotación en el eje Y, es decir, el sensor será capaz de girar 360° sin que se presente un obstáculo físico.

Se prevé limitar el margen de rotación de este eje a 140° en total, dividiendo esta cantidad entre dos para cada dirección y teniendo como punto 0, la ubicación donde el sensor se encuentra como en la Figura 2.4. Eje X - Concepto B.

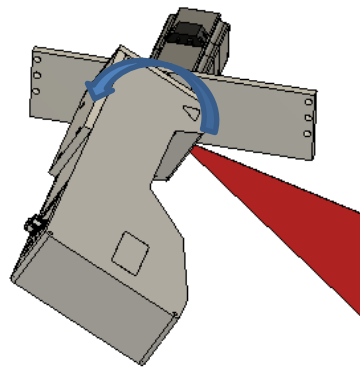


Figura 2.5. Rotación en X.

### 2.1.3. SELECCIÓN DE IDEAS

Para la valoración y selección objetiva de los conceptos expuestos anteriormente se procede a elaborar una calificación ponderada de aspectos que se consideran relevantes en el sistema de rotación del eje X.

Aspecto	Ponderación	Concepto A		Concepto B	
Facilidad de fabricación	20%	8	1,6	8	1,6
Torque necesario para rotar	20%	5	1,0	9	1,8
Peso soportado por el eje del motor	15%	6	0,9	7	1,05
Dimensiones necesarias en el eje vertical	15%	7	1,05	7	1,05
Dimensiones necesarias en el eje horizontal	10%	9	0,9	4	0,4
Facilidad de acople al sensor	20%	7	1,4	7	1,4
<b>RESULTADOS</b>	<b>100%</b>	<b>6,85</b>		<b>7,3</b>	

Tabla 2.1. Selección de concepto para el Eje X

Teniendo en cuenta los resultados, el diseño estará basado en el concepto B. El menor torque necesario para rotar, así como el peso soportado por el eje del motor han sido los aspectos que han favorecido esta elección.

#### 2.1.4. SELECCIÓN DEL MOTOR

En este paso, se contemplan como opciones de uso los siguientes:

- Motor paso a paso: es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados dependiendo de sus entradas de control.
- Servomotor: es un dispositivo similar a un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

De la misma forma en que se decidió el concepto para la rotación en X, se procede a elaborar una calificación ponderada de aspectos importantes para el motor de este eje.

Aspecto	Ponderación	Motor paso a paso		Servomotor	
Costo	40%	9	3,6	4	1,6
Facilidad de uso	30%	8	2,4	7	2,1
Tamaño	20%	7	1,4	7	1,4
Velocidad	10%	6	0,6	8	0,8
<b>RESULTADOS</b>	100%	8		5,9	

Tabla 2.2. Selección del Motor para el eje X

En este caso, se observa que el factor costo fue muy determinante y es que, un servomotor con prestaciones similares a las de un motor paso a paso del mismo tamaño, es considerablemente más costoso.

Teniendo en cuenta el peso del sensor y de las piezas mecanizadas en conjunto, se obtiene un peso total aproximado de 2,5 Kg. El centro de gravedad de este conjunto fue calculado en el software de diseño y se estimó que se encuentra a una distancia de 0,007m del eje del motor en la dirección X y de 0,000795m para la dirección en Y, con lo cual se procede a calcular el torque necesario que debe producir el motor para ejercer la rotación.

$$T = F * D \quad (2.1)$$

$$T = 0,152 \text{ N/m}$$

A este valor hallado se le añade un factor de seguridad de 1,6. Por lo tanto, el valor del torque necesario para este motor, será de

$$T = 0.244 \text{ N/m}$$

Una vez que se conoce el valor del torque que se requiere para asegurar el giro, se procede a buscar un motor que no solo cumpla con este requerimiento, sino que también sea capaz de asegurar robustez una vez se asegure la carga al eje. Asimismo, se desea que la longitud del motor sea la mínima posible. Se ha seleccionado un motor NEMA 23 del fabricante Nanotec que cuenta con las siguientes especificaciones:

Especificaciones motor Eje X		
Tensión	V DC	48
Intensidad	A	2.8
Par de retención	Nm	0.6
Angulo de paso	°	1.8
Tamaño	mm	56
Longitud	mm	40.5

Tabla 2.3. Datos técnicos del motor eje X [2]

### 2.1.5. SUJECCIÓN

En este punto, se hace manifiesto el problema para sujetar el eje del motor a la pieza donde se sitúa el sensor, problema que ya se evidencio en el primer diseño del módulo, por ende y dado que no se encuentran componentes comerciales para realizar dicho ajuste, se decide usar una reductora con brida ISO 9409, que además de solucionar el problema con la sujeción, proporciona un torque adicional respecto al necesario y además provee una resolución mayor al momento de realizar la rotación, ya que la cantidad de grados por paso del motor se verán afectados según la relación de la reductora.

### 2.1.6. SELECCIÓN DE REDUCTORA

Los factores determinantes para la búsqueda de la reductora fueron:

- Tamaño, entre más compacta mejor.
- Brida de salida, se requería una reductora que contara con un diseño para la fácil adaptación a la pieza que sujeta el sensor.
- Eje de entrada, que coincidiera con las dimensiones del eje del motor.



Figura 2.6. Reductora Planetaria PD053 [3].

La reductora elegida fue una PD053 del fabricante Apex dynamics y cuenta con las siguientes características:

Relación		1:10
Etapas		1
Par nominal de salida	Nm	10
Par máximo de salida	Nm	3 veces el par nominal de salida
Juego angular	arcmin	$\leq 8$
Carga radial máxima	N	1045
Carga axial máxima	N	523
Rendimiento	%	$\geq 97$

Tabla 2.4. Datos técnicos de la reductora en el eje X

Dadas las propiedades de la reductora elegida, el torque final proporcionado del motor ensamblado con esta, es de 5,82N, con lo que asegura robustez suficiente para mover este eje. También se hace necesario mencionar que el juego presente en comparación al modelo previo, se ve mejorado en un amplio margen, puesto que anteriormente se contaba con un juego superior a 60arcmin, mientras que ahora este juego se ve minimizado a un máximo de 8arcmin que equivale a 0.13°.

### **2.1.7. MICROINTERRUPTORES**

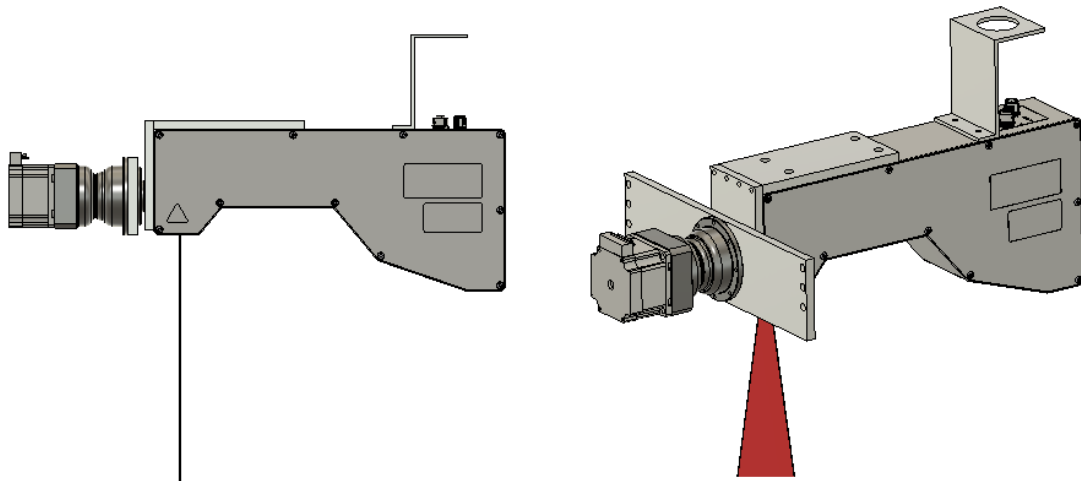
Para delimitar el rango de movimiento de este eje, se escogieron estos microinterruptores con palanca de rodillo que están sellados y tienen una alta resistencia ambiental. Además, cuentan con conexiones de cable en conformidad con IP67.



*Figura 2.7. Microinterruptor con palanca de rodillo [4].*

### **2.1.8. ENSAMBLE EJE X**

Al tener todos los componentes seleccionados, el diseño del eje X se visualiza a continuación:



*Figura 2.8. Ensamble del eje X.*

Adicional a las piezas descritas en el transcurso de este apartado, se incluyó una chapa metálica sobre el sensor, con el propósito de mantener los cables del sensor en orden en una posición fija, cuando se presenten rotaciones en el eje Y. Los planos para las piezas descritas en esta sección pueden ser vistos en la sección de Anexos - PLANOS MECÁNICOS

## 2.2. Ideas para el eje Y

Partiendo del sistema para rotar en el eje X, se realizaron diferentes bocetos de las piezas para la sujeción del anterior mecanismo, en este caso se contará con dos piezas metálicas que lo sujetaran para lograr la rotación en el eje Y, mientras habrá otra pieza de donde estará sostenido el sistema de rotación en Y y por consiguiente el sistema de rotación en X. A este efecto, al igual que en el eje X, se tuvieron en cuenta diversas alternativas y a continuación serán expuestas dos de ellas.

### 2.2.1. CONCEPTO A

En esta idea se buscaba proponer que el eje del motor encargado del movimiento en Y se posicionara centrado con respecto a la longitud horizontal total del sistema en X. El sistema se compone de una pieza metálica en forma de T, cuyos extremos laterales estarán asegurados a otras dos piezas en forma de L como se puede observar Figura 2.9. Eje Y - Concepto A. Las piezas adyacentes a la pieza soporte del eje X estarán unidas a su vez al eje del motor y a otra parte que servirá de eje de rotación y que se definirá más adelante. Este boceto fue concebido de esta manera pensando en reducir el torque necesario para la rotación, asimismo, y pensando en el eje del motor de la dirección Y como punto 0 en un eje de coordenadas, se quiso lograr que la distancia prolongada sobre el eje X en el sentido positivo, fuera la mínima posible.

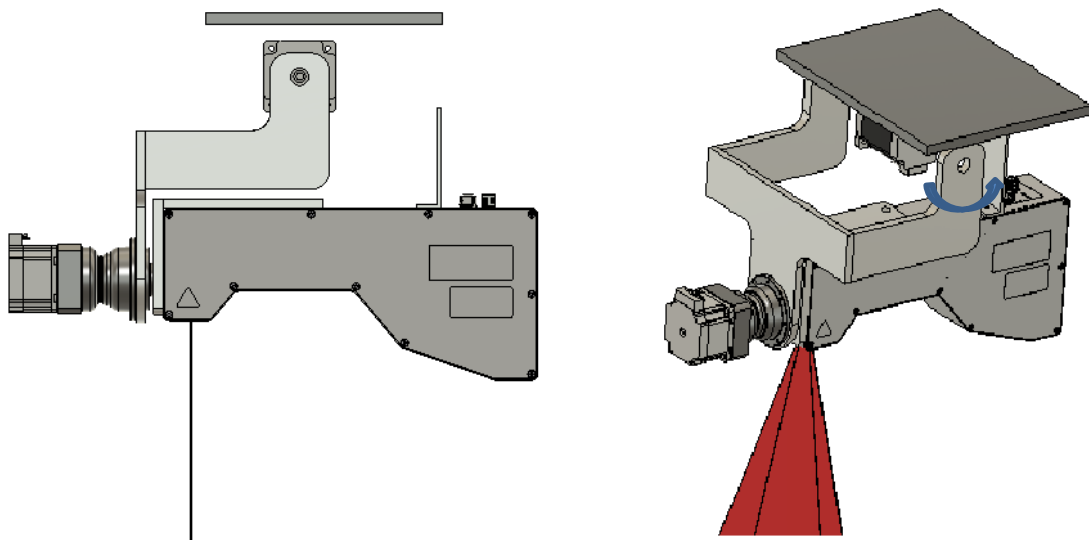


Figura 2.9. Eje Y - Concepto A.

### 2.2.2. CONCEPTO B

El cambio en este diseño respecto al anterior, es principalmente la distancia que se tiene desde el punto 0. Ahora la distancia en el sentido positivo del eje X es mayor, pero las piezas para soportar el sistema de rotación en X, exhiben un menor grado de dificultad para ser fabricadas.

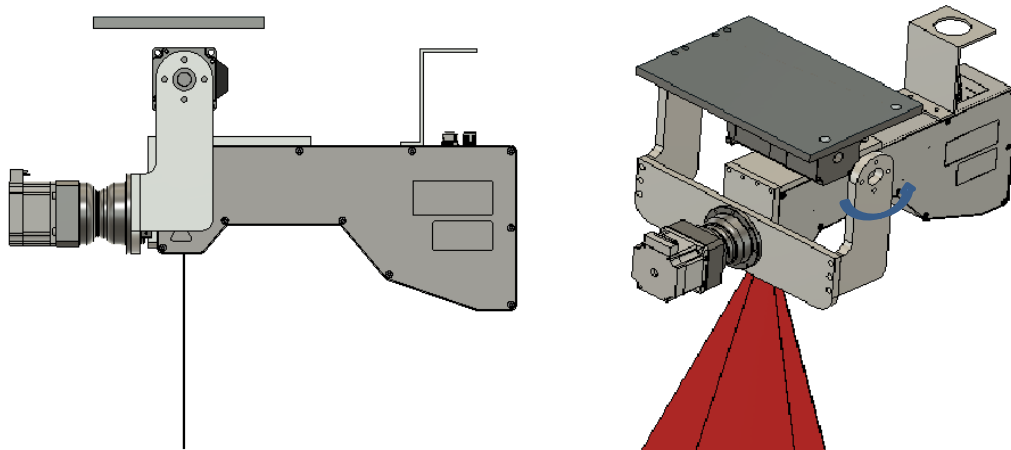


Figura 2.10. Eje Y - Concepto B.

En este diseño también cabe destacar, que al momento de simular el movimiento se presenta un mayor ángulo de rotación, gracias a que la pieza que mantiene los cables en orden se encuentra más alejada del eje rotación, previniendo así que los cables puedan colisionar con la chapa que soporta todo el sistema XY.

### 2.2.3. SELECCIÓN DE IDEAS

Para la valoración y selección objetiva de los diseños expuestos anteriormente se procede a elaborar una calificación ponderada de aspectos que se consideran relevantes en el sistema de rotación del eje Y.

Aspecto	Ponderación	Concepto A		Concepto B	
Facilidad de fabricación	30%	5	1,5	8	2,4
Torque necesario para rotar	30%	8	2,4	6	1,8
Rango de rotación	30%	4	1,2	8	2,4
Dimensiones en el eje horizontal con respecto al punto 0	10%	9	0,9	4	0,4
<b>RESULTADOS</b>	<b>100%</b>	<b>6</b>		<b>7</b>	

Tabla 2.5. Selección de concepto para el Eje Y

En vista de los resultados, el diseño se basará en el concepto B. La facilidad de fabricación, así como el rango de rotación facilitaron esta elección. De igual modo, algunas piezas fueron modificadas para facilitar su fabricación y por ende minimizar sus costos de fabricación.

### 2.2.4. SELECCIÓN DEL MOTOR

La selección del motor para este eje también se basó en la Tabla 2.2. Selección del Motor para el eje X por lo cual para el movimiento en este caso también será utilizado un motor paso a paso.

Sumando el peso total del mecanismo para el eje X y de las piezas mecanizadas para sostenerlo en conjunto, se obtiene un peso total aproximado de 4,5 Kg. El centro de gravedad de este conjunto fue calculado en el software de diseño y se estimó que se encuentra a una distancia de 0,167m del eje del motor, con lo cual se procede a calcular con la fórmula 2.1 el torque necesario que debe producir el motor para ejercer la rotación.

$$T = 7,36 \text{ N/m}$$

A este valor hallado se le añade un factor de seguridad de 1,6. Por lo tanto, el valor del torque necesario para este motor, será de

$$T = 12N/m$$

Después de haberse establecido el torque requerido para asegurar el giro, se da paso a la búsqueda de un motor que tenga unas medidas compactas y suministre un torque suficiente, para que, en combinación con una reductora sea capaz de asegurar la rotación en este eje.

Dado que para este motor se encuentran varios fabricantes que ofrecen las mismas especificaciones con la misma longitud, se opta por elegir el productor con el mejor precio. El motor seleccionado es un NEMA 23 del fabricante Stepperonline.

<b>Especificaciones motor Eje Y</b>		
Tensión	V DC	48
Intensidad	A	5.0
Par de retención	Nm	2
Angulo de paso	°	1.8
Tamaño	mm	57
Longitud	mm	76.5

Tabla 2.6. Datos técnicos del motor eje Y [5].

### **2.2.5. SELECCIÓN DE REDUCTORA**

Al igual que en el anterior eje se decidió usar una reductora con brida ISO 9409, para simplificar la sujeción. La reductora escogida fue una PD064 del fabricante Apex dynamics y cuenta con las siguientes características:

Relación		1:10
Etapas		1
Par nominal de salida	Nm	27
Par máximo de salida	Nm	3 veces el par nominal de salida
Juego angular	arcmin	$\leq 7$
Carga radial máxima	N	880
Carga axial máxima	N	440
Rendimiento	%	$\geq 97$

Tabla 2.7. Datos técnicos de la reductora en el eje Y [3].

Conociendo las características de la reductora elegida, el torque final proporcionado en este eje será de 19,4N, cifra suficiente para rotar en este eje. En este diseño el juego presente también se ve reducido en comparación al modelo previo, puesto que anteriormente se contaba con un juego superior a 60arcmin y ahora este juego se ve minimizado a un máximo de 7arcmin que equivale a 0.12°.

### **2.2.6. DISEÑO EN DETALLE**

#### **2.2.6.1. SOPORTE SUPERIOR**

Esta pieza se encarga de unir los sistemas de rotación XY con el sistema de traslación en Z y cuenta con diferentes orificios para facilitar la sujeción a dichos sistemas, así como dos agujeros extras para una pequeña caja que se mencionará más adelante. El espesor para esta parte será de 10mm.

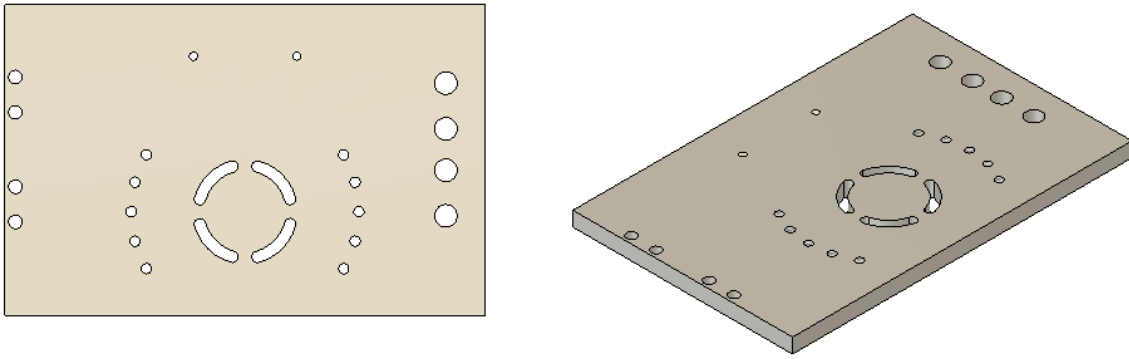


Figura 2.11. Soporte superior.

Aparte de contar con orificios de diferentes métricas para los elementos de sujeción, esta pieza incluye el siguiente detalle, que ha sido diseñado para proporcionar al sistema la capacidad de girar con respecto al eje Z.

Según la experiencia de la empresa, se considera suficiente que el sistema pueda rotar hasta  $30^\circ$  con intervalos de  $15^\circ$  en ambos sentidos del eje. Este método es bastante sencillo y consiste en seis tornillos asegurando esta pieza al eje Z. Dos tornillos definirán la posición en el ángulo deseado, mientras los cuatro restantes permitirán la rotación del sistema mientras lo aseguran.

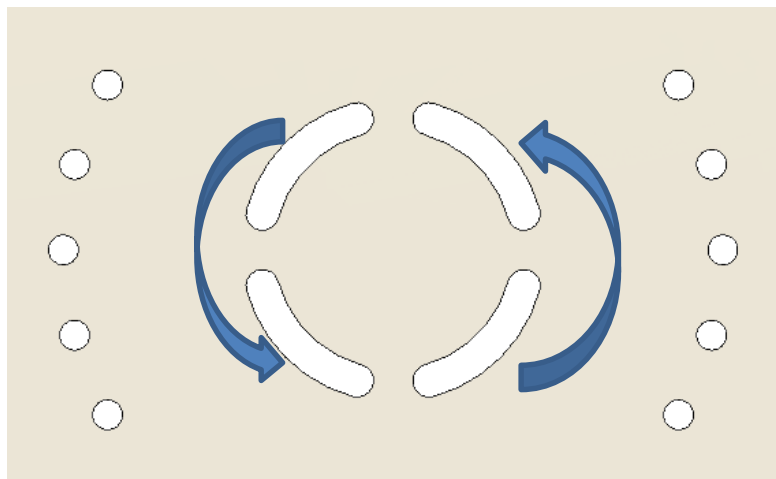


Figura 2.12. Detalle de soporte superior para girar el sistema XY.

### 2.2.6.2. SOPORTE DE LA REDUCTORA

En esta parte es donde estará sujeto el motor con la reductora. Este diseño tuvo en cuenta la longitud horizontal del soporte superior, ya que en esta distancia se incluirán los demás soportes y los actuadores. Aparte de escoger un espesor de 10mm para garantizar un buen soporte, también es útil este grosor para seleccionar tornillos suficientemente grandes que puedan afianzar todo el sistema.



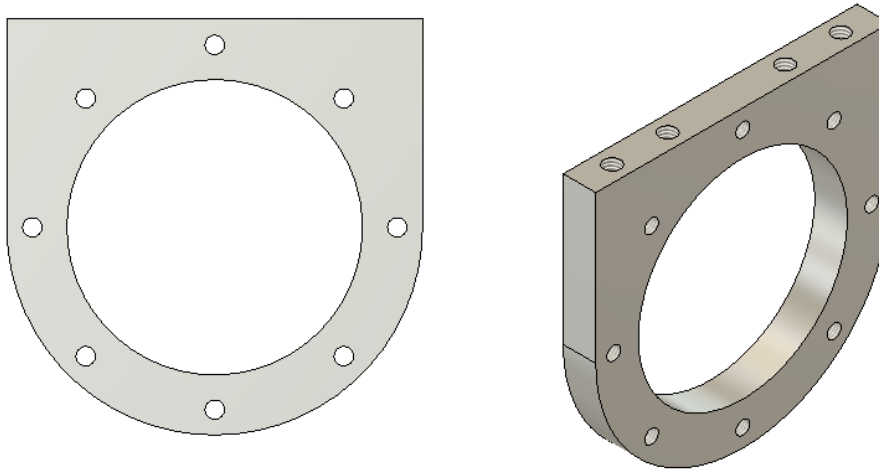


Figura 2.13. Soporte reductora eje Y.

### 2.2.6.3. SOPORTES LATERALES

Los soportes laterales son las piezas que conectan el eje Y con el eje X, inicialmente contaban con un diseño como el visible a la izquierda en la Figura 2.14. Soportes laterales para el eje Y, pero se decidió simplificarlo para minimizar costos de producción. La longitud vertical fue definida una vez se simuló el sistema, esto para corroborar que fuera lo más compacta posible además de asegurar que no presentaran colisiones bajo ninguna posición en el rango de rotaciones del mecanismo.

El rango de rotación para este eje quedo definido en  $140^\circ$ , siendo divididos en  $80^\circ$  cuando el motor gire en sentido horario y  $60^\circ$  en el sentido anti horario.

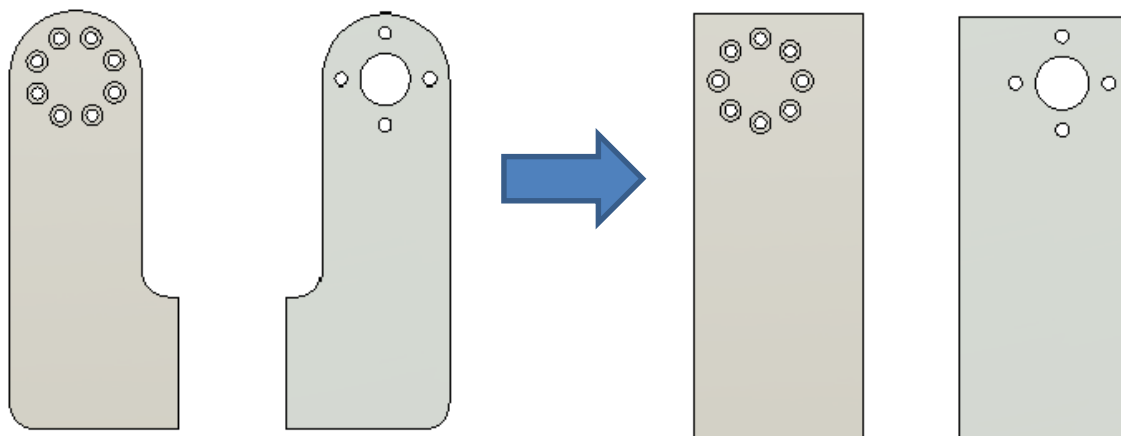


Figura 2.14. Soportes laterales para el eje Y

### 2.2.6.4. RODAMIENTO.

Con el fin de facilitar el movimiento en este eje, se seleccionó un rodamiento de soporte UCP 204 que cuenta con unas medidas óptimas para ser incluido en este mecanismo. Además de ofrecer un soporte rígido con una pequeña fricción entre un eje y las piezas conectadas, también es útil para mantener los soportes laterales alineados.



Figura 2.15. Rodamiento eje Y [6].

### 2.2.6.5. BULÓN

Esta pieza se utiliza como pasador para unir uno de los soportes laterales con el rodamiento. Por otra parte, hace uso de cuatro tornillos y sus agujeros tienen escariados para esconder la cabeza de estos, la longitud del eje es suficiente para que el bulón pueda ser asegurado por el tornillo prisionero presente en el rodamiento, teniendo en cuenta que tampoco debe ser muy largo para evitar contacto con la cara posterior del motor.

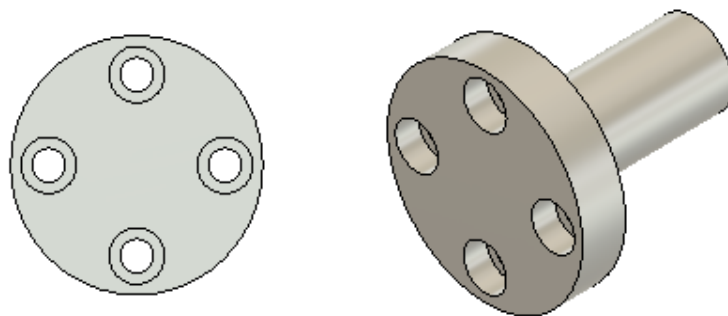


Figura 2.16. Bulón eje Y.

### 2.2.6.6. SUPLEMENTO PARA EL RODAMIENTO

Una vez ensamblado el conjunto del motor con reductora a los soportes, se observó que el eje del motor no era coincidente con el eje del rodamiento, por lo cual se decidió fabricar un suplemento para el rodamiento, es decir, una pieza adicional que ayudara a alinear estos ejes. Cabe mencionar, que la altura del soporte de la reductora fue considerada en paralelo con esta pieza, para así diseñar un suplemento bajo un grosor de chapa comercialmente disponible.

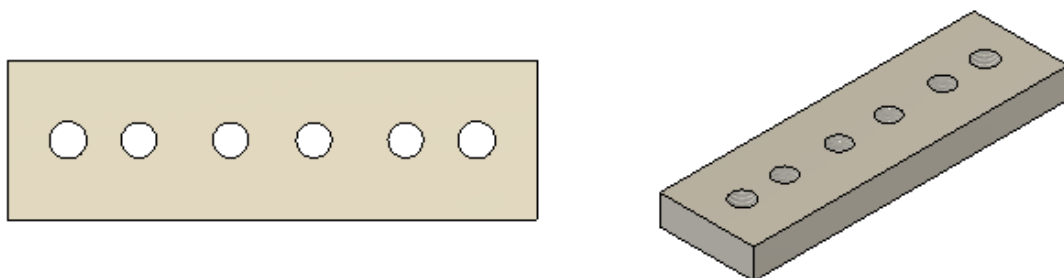


Figura 2.17. Soporte Rodamiento.

### 2.2.6.7. SOPORTE PARA MICROSWITCHES

Estas pequeñas piezas serán añadidas a los costados laterales del soporte de la reductora, con el fin del albergar unos pequeños microswitches que limitarán el rango de rotación del eje Y.



Figura 2.18. Soporte Microswitches.

### 2.2.6.8. MICROINTERRUPTORES

Los microinterruptores elegidos para este eje son unos activados por plunger y fueron elegidos por su reducido tamaño. Además, según el fabricante este microinterruptor gracias a su protección de clase IP6K7 no tiene rebotes ni histéresis, lo cual resulta ideal para el propósito de este módulo.



Figura 2.19. Microinterruptor activado por plunger [7].

### 2.2.6.9. CAJA ELÉCTRICA

Esta pequeña caja eléctrica fue incluida para facilitar el ordenamiento de los cables provenientes de los motores y los microswitches. Dentro de esta, se ubicarán borneras con las conexiones provenientes del tablero principal de control, que a su vez se conectarán con los cables inicialmente mencionados. Se planteó de esta forma para minimizar el trabajo cuando se tengan que realizar labores de mantenimiento.



Figura 2.20. Caja eléctrica ejes XY [8].

### 2.2.6.10. CANALETA

Se decidió usar una canaleta para guiar los cables sobre las superficies de los soportes previamente diseñados, con este elemento se evitan los agujeros en las chapas del diseño anterior y se facilitara el trabajo de mantenimiento.

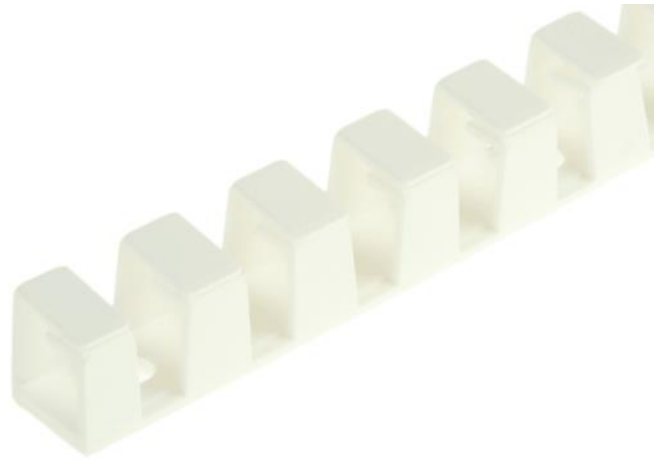


Figura 2.21. Canaleta [9].

### 2.2.7. ENSAMBLE EJES XY

Una vez diseñado y seleccionado todos los componentes del eje Y, se expone a continuación el resultado del ensamble del conjunto para los ejes X y Y.

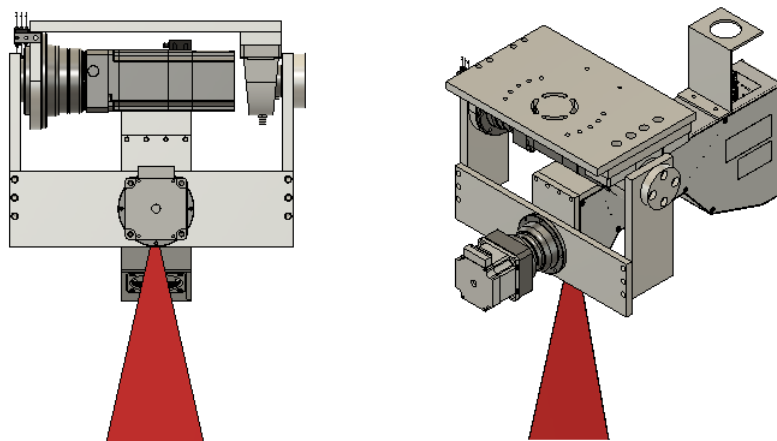


Figura 2.22. Ensamble ejes XY.

Los planos para las piezas diseñadas en esta sección pueden ser vistos en la sección de Anexos - PLANOS MECÁNICOS

### 2.3. Ideas para el eje Z

Para la concepción del movimiento en este eje se analizó la problemática preliminar, consistente en la elevada presencia de vibraciones debido a una mala sujeción de la unidad lineal de translación. Una posible solución, consiste en mejorar la fijación del módulo, pero también se

quiere evaluar otra alternativa. Como condición inicial se buscaron opciones capaces de trasladar la carga total de los ejes XY junto con el sensor, así como con un margen de movimiento mínimo de 450mm, siendo estos una medida estándar definida por la empresa, pero con posibilidad de cambiarse si así se requiriera.

### 2.3.1. CONCEPTO A

Esta solución es la previamente mencionada y consiste en brindar un mejor posicionamiento a la base fija del actual modulo lineal.

El desplazamiento por el eje Z es realizado por una unidad lineal con accionamiento por correa dentada, esta unidad utiliza una correa dentada de poliuretano tipo AT pretensada y reforzada. En combinación con una polea de transmisión de retroceso cero, esta unidad presenta unas dimensiones compactas y además proporciona características de alto rendimiento tales como, alta velocidad, buena precisión y repetibilidad para aplicaciones verticales.



Figura 2.23. Unidad lineal UNIMOTION [10].

En el diseño actual de la empresa se puede observar como la base estática de este módulo no se encuentra bien sujeta, teniendo la mayor parte de su superficie libre, lo cual resulta en vibraciones que se ven multiplicadas por la carga que se debe desplazar en cada movimiento.

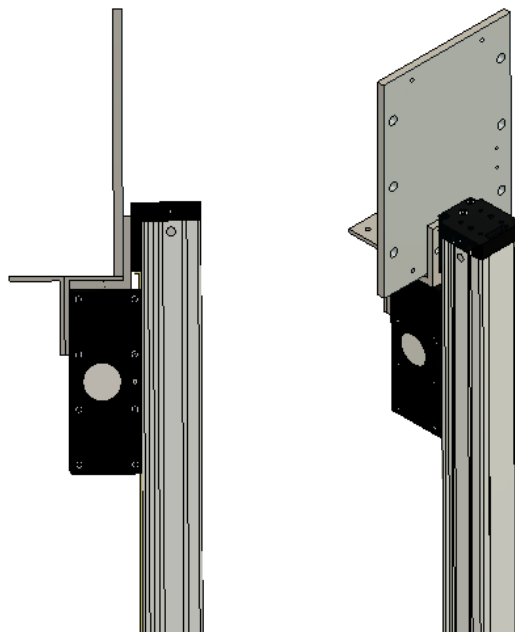


Figura 2.24. Sujeción sistema actual.

La propuesta de cambio para el nuevo sistema consiste en un mejor posicionamiento de la base estática, para esto, se dejan de usar piezas adicionales para sujetar el modulo por su cara superior

y se opta por apoyar toda la superficie de la cara posterior de esta base sobre el soporte que tendrá este módulo, aumentando así el área de apoyo y brindando más firmeza a la unidad.

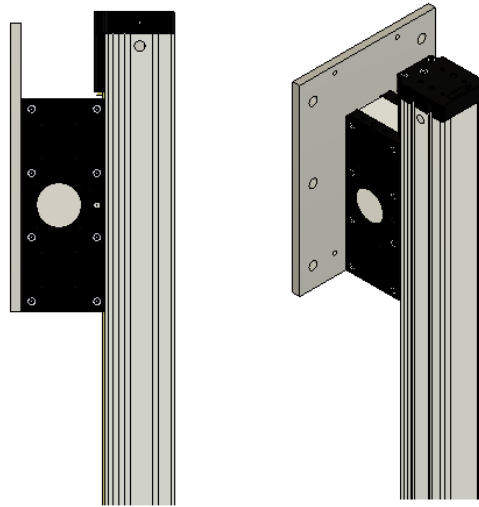


Figura 2.25. Sujeción para el nuevo sistema.

Esta unidad lineal cuenta con las siguientes características:

Velocidad lineal Máxima	m/s	5
Fuerza máxima de transmisión	N	500
Avance por revolución del eje de entrada	mm/rev	165
Tipo de correa		AT5
Fuerza máxima de transmisión de la correa	N	500
Repetibilidad máxima	mm	$\pm 0,08$

Tabla 2.8. Características de la correa y la polea [10].

### 2.3.2. CONCEPTO B

En la búsqueda de más opciones comerciales para el desplazamiento en el eje Z, se encontró una opción consistente de un elevador mecánico, cuyo mecanismo de transmisión de movimiento es basado en un sistema sinfín-corona.



Figura 2.26. Elevador mecánico por cremallera LIFGO [11].

El sistema estaría ajustado como se observa en la Figura 2.27. Sujeción sistema Lifgo. El fabricante ha sido contactado y asegura que no es necesario implementar alguna clase de soporte adicional para movilizar la carga, sin embargo, puesto que este elevador cuenta con diferentes modelos, se

debe seleccionar el que brinda las mejores prestaciones para asegurar el movimiento y con esto, el valor de esta solución también se ve incrementado.

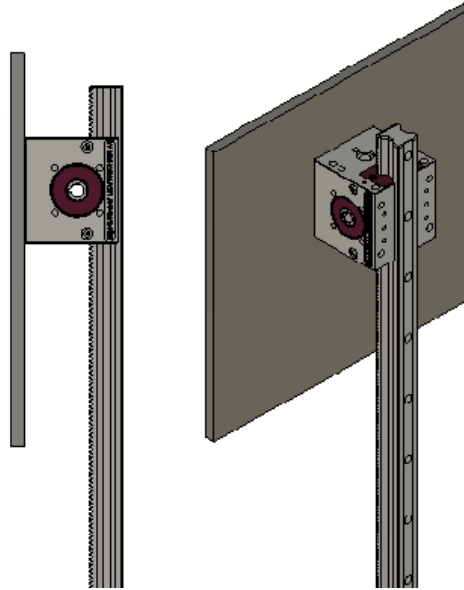


Figura 2.27. Sujeción sistema Lifgo.

Este elevador mecánico ofrece las siguientes características:

Velocidad lineal Máxima	m/s	3
Potencia de elevación	N	2000
Eficiencia	%	92
Aceleración	m/s <sup>2</sup>	50
Relación de engranajes	mm/360°	62.8318

Tabla 2.9. Características técnicas elevador mecánico [11].

### 2.3.3. SELECCIÓN DE IDEAS

Para la valoración y selección objetiva de los conceptos expuestos anteriormente se procede a elaborar una calificación ponderada de aspectos que se consideran relevantes en el sistema de translación del eje Z.

Aspecto	Ponderación	Concepto A		Concepto B	
Velocidad lineal máxima	20%	8	1,6	7	1,4
Fuerza máxima	20%	6	1,2	8	1,6
Costo	40%	7	2,8	5	2,0
Juego	20%	9	1,8	7	1,4
<b>RESULTADOS</b>	100%	7,4		6,4	

Tabla 2.10. Selección de concepto para el Eje Z

En vista de los resultados, el diseño se basará en el concepto A, que consigue mejores resultados en todos los aspectos menos en la fuerza máxima. De igual modo, la empresa ya ha tenido experiencias positivas con la unidad lineal del concepto A y se confía en mejorar su rendimiento con un mejor agarre al soporte fijo del módulo. No obstante, se considera positivo el haber estudiado otras alternativas a las ya utilizadas, puesto que podrán ser útiles en futuros proyectos de la empresa.

### 2.3.4. SELECCIÓN DEL MOTOR

El motor a utilizar en este eje al igual que en los dos anteriores será un motor paso a paso.

El peso total aproximado del mecanismo y las piezas mecanizadas para sostenerlo en conjunto es de 14,4 Kg. El centro de gravedad de este conjunto fue calculado en el software de diseño y se estimó que se encuentra a una distancia de 0,1179m del eje del motor, con lo cual se procede a calcular con la fórmula 2.1 el torque necesario que debe producir el motor para ejercer la rotación.

$$T = 16,65 \text{ N/m}$$

A este valor hallado se le añade un factor de seguridad de 1,5. Por lo tanto, el valor del torque necesario para este motor, será de

$$T = 25 \text{ N/m}$$

Después de haberse establecido el torque requerido para asegurar el giro, se indagaron combinaciones de motor/reductora con medidas compactas que provean un torque suficiente para la traslación vertical. El motor seleccionado es un NEMA 24 del fabricante Stepperonline.

<b>Especificaciones motor Eje Z</b>		
Tensión	V DC	48
Intensidad	A	4.24
Par de retención	Nm	4
Angulo de paso	°	1.8
Tamaño	mm	60
Longitud	mm	100

Tabla 2.11. Datos técnicos del motor eje Z [12].

### 2.3.5. SELECCIÓN DE REDUCTORA

Para este eje, al igual que en el diseño original de la empresa, se decide usar una reductora a 90° para minimizar la longitud horizontal del módulo y hacerlo así más compacto. En este punto, la sujeción ya no es un problema, puesto que la reductora ahora irá ensamblada con la unidad lineal, en consecuencia, se buscan soluciones comerciales para acoplar el eje de salida de la reductora con el de la unidad lineal. Este ajuste de los ejes es realizado con ayuda de un acoplamiento adicional diseñado para compensar la desalineación y amortiguar las vibraciones en aplicaciones de indexación, mientras que para sujetar el cuerpo del motor se utilizó una campana del fabricante Unimotion. La reductora escogida fue una PEIIR070 del fabricante Apex dynamics y cuenta con las siguientes características:

Relación		1:7
Etapas		1
Par nominal de salida	Nm	35
Par máximo de salida	Nm	3 veces el par nominal de salida
Juego angular	arcmin	≤ 11
Carga radial máxima	N	1150
Carga axial máxima	N	575
Rendimiento	%	≥ 93



Tabla 2.12. Datos técnicos de la reductora en el eje Y [13]

Conociendo las características de la reductora elegida, el torque final proporcionado en este eje será de 26,04N. Valor suficiente para ejecutar el movimiento en la dirección Z. En este diseño el juego presente en comparación al anterior es el mismo, debido a que se usará una reductora con las mismas características, sin embargo, se refleja una reducción de peso al utilizar un motor más pequeño, dicha diferencia es de 2,5kg y puede ser verificada en el apartado correspondiente al 31 del módulo.



Figura 2.28. Reductora planetaria PEIIR070 [13].

### **2.3.6. DISEÑO EN DETALLE**

#### **2.3.6.1. SOPORTE DEL MODULO**

Esta pieza contiene todos los agujeros requeridos para sostener el sistema en su totalidad, aparte de los orificios presentes para soportar el modulo, se encuentran también para sujetar la caja eléctrica del sistema y una cadena portables que serán definidos más adelante. Por último, se añaden agujeros de donde se sujetará esta pieza soporte al arco en donde estarán los demás módulos para la construcción del túnel de inspección.

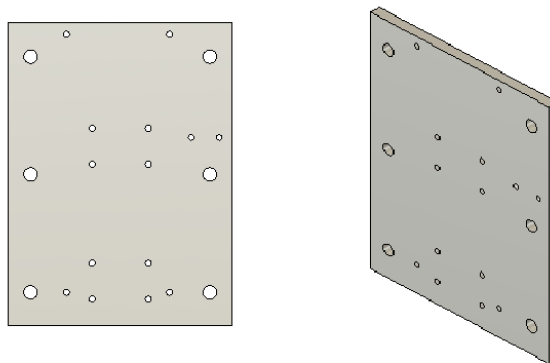


Figura 2.29. Soporte del módulo.

#### **2.3.6.2. SEPARADORES**

Estos elementos fueron diseñados para sujetar a distancia la caja eléctrica del módulo. Para su concepción se tuvo en cuenta el peso de la caja eléctrica con sus elementos internos y la anchura del módulo.



Figura 2.30. Separadores caja eléctrica.

### 2.3.6.3. CADENA PORTACABLES

Dentro del catálogo de productos de la empresa IGUS, se seleccionó la siguiente cadena para la protección de los cables desde la pequeña caja eléctrica hasta la caja eléctrica del módulo. Este componente estará ubicado entre la caja eléctrica y el soporte del módulo, es decir, podrá contar con un radio de curvatura máximo de hasta la longitud escogida para los separadores. Dada la ubicación de esta cadena, se eligió el mayor radio de curvatura posible y un ancho interior mayor al diseño original de la empresa, siendo estos 48 y 50mm respectivamente.



Figura 2.31. Cadena portacables IGUS [14].

### 2.3.6.4. CAJA ELÉCTRICA

Para albergar los dispositivos electrónicos de este sistema, se ha escogido una caja eléctrica del fabricante RITTAL, con las siguientes características:

Alto	mm	300
Ancho	mm	120
Largo	mm	200
Peso	Kg	3.63
Código Ik		IK08
Grosor	mm	1.25

Tabla 2.13. Características caja eléctrica RITTAL [15]



Figura 2.32. Caja eléctrica Rittal [15].

### 2.3.6.5. MICROINTERRUPTORES

Para delimitar el rango de movimiento de este eje, se escogieron estos microinterruptores con palanca articulada que están sellados y tienen una alta resistencia ambiental. Además, cuentan con conexiones de cable en conformidad con IP67.



Figura 2.33. Microinterruptor con palanca articulada [16].

### 2.3.6. ESCUADRA DE UNIÓN

A fin de unir la unidad lineal con el mecanismo de los ejes XY se hace esta pieza, considerando que los vértices en las esquinas inferiores no pueden estar presentes, debido a que se exhiben colisiones cuando se plantea rotar el soporte superior. Por este motivo se incluyen chaflanes.

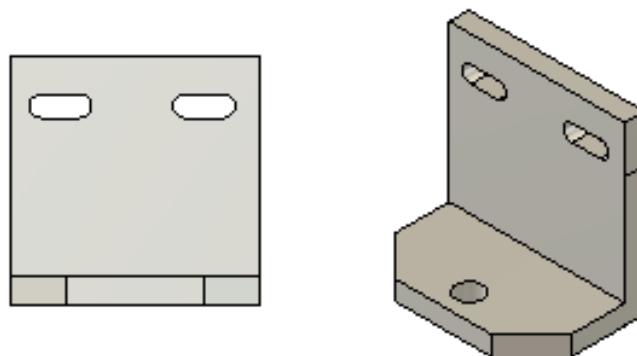


Figura 2.34. Escuadra unión.

## 2.4. Ensamble total del módulo

A continuación, se enseña el módulo una vez se ha diseñado y se han seleccionado todos los componentes que lo componen. Adicional al diseño previamente desarrollado se aclara, que por motivos de seguridad se incluyeron frenos electromagnéticos en los ejes Y y Z, para asegurar que el módulo no se moverá mientras este no se encuentre en funcionamiento. Es válido aclarar que el presente diseño estará sujeto a un arco metálico, cuyo travesaño contará con agujeros a diferentes distancias para mantener los módulos fijos, según el requerimiento de cada cliente.

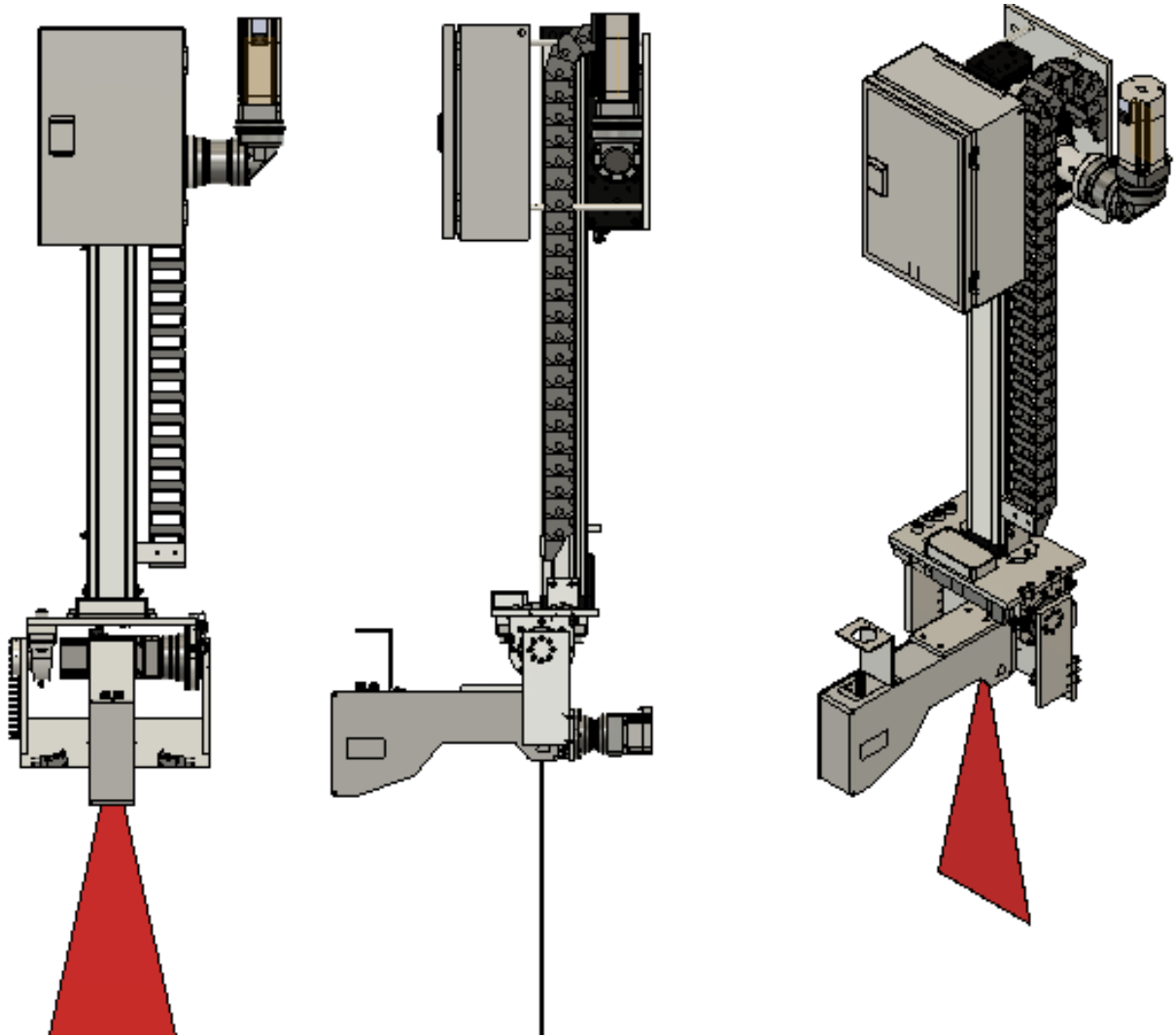
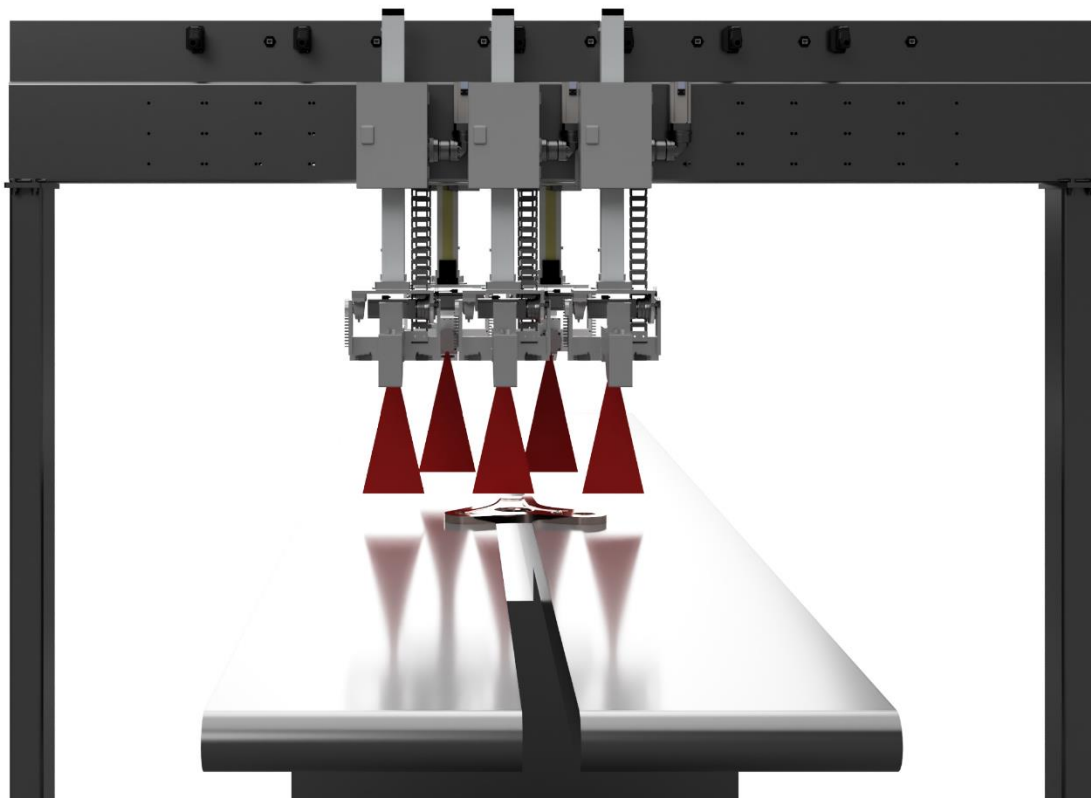
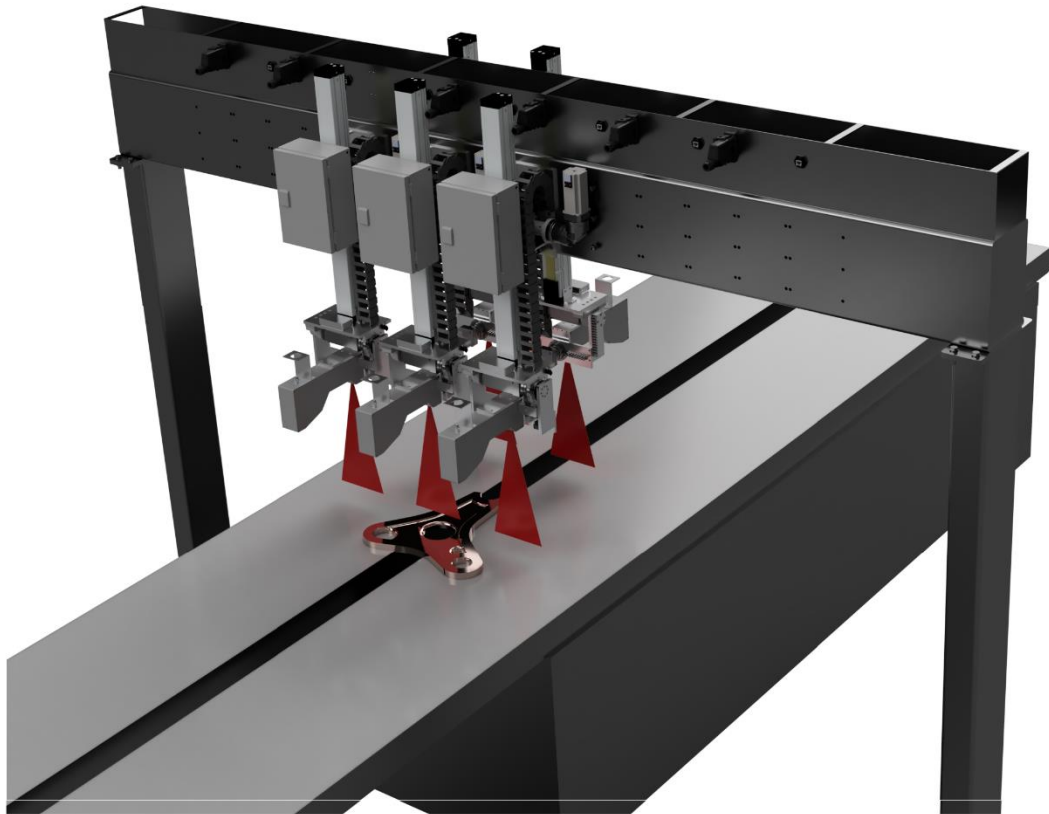


Figura 2.35. Módulo completo.



*Figura 2.36. Túnel de inspección con módulos rediseñados.*

En total, para el ensamble del módulo son necesarios 112 tornillos distribuidos como se muestra a continuación:

Ubicación	Cantidad	Tamaño	Longitud	Norma
Eje motor Y	4	M6	15	DIN912
Soporte superior/rodamiento	4	M10	20	DIN912
Soporte superior/rodamiento	2	M10	25	DIN912
Soporte superior	4	M5	20	DIN 933
Reductora Y	8	M4	12	DIN912
Soporte Lateral	6	M6	20	DIN912
Soporte motor X	8	M3	12	DIN912
Soporte motor Y	8	M5	16	DIN912
Soporte microswitch_Y	2	M3	8	DIN912
Soporte microswitch_Y	2	M4	12	DIN912
Suporte superior	4	M6	20	DIN912
Soporte para sensor	4	M4	25	DIN912
Sensor	4	M4	12	DIN912
motor-reductora Y	4	M5	12	DIN912
motor-reductora x	4	M5	12	DIN912
Reductora X	6	M4	12	DIN912
Soporte microswitch	4	M3	16	DIN912
Unidad lineal	8	M5	16	DIN912
portacables	2	M6	10	DIN7991
portacables	2	M6	14	DIN7991
Soporte caja eléctrica	4	M5	12	DIN912
Soporte cables sensor	2	M4	12	DIN912
Caja	2	M5	12	DIN7991
T escuadra	4	M4	12	DIN912
Pieza microswitch_Y	2	M4	12	DIN912
Microswitch Z	2	M5	12	DIN912
Microswitch Z	2	M3	12	DIN912
Microswitch X	4	M3	16	DIN912

Tabla 2.14. Tornillería módulo de inspección

#### 2.4.1. VELOCIDAD DE OPERACIÓN

Según la información de los datasheets de los motores, cada uno de estos puede desarrollar una velocidad máxima de  $\approx 1000\text{rpm}$ , siendo así y como referencia se deciden usar  $600\text{rpm}$  como velocidad de operación en cada motor, por lo cual se tiene que:

$$\text{Velocidad en los ejes XY} = \frac{600}{10} = 60\text{rpm} = 360^\circ/\text{s}$$

Teniendo en cuenta que ambos ejes cuentan con una reductora de 1:10

$$\text{Velocidad en el eje Z} = \frac{600}{7} = 85,71\text{rpm} = 165\text{mm} * 1,42\text{rps} = 234,3\text{mm/s}$$

Teniendo en cuenta que el avance por revolución del módulo escogido es de  $165\text{mm}$  por revolución.

**2.4.2. PESO DEL MODULO**

En este apartado se calculará el peso total del módulo diseñado y se contrastará con el peso del anterior módulo.

<b>REF. PIEZA</b>	<b>PESO(g)</b>	<b>NOMBRE DE PIEZA</b>
CIN-01-03	1423	Soporte modulo
CIN-01-04	32,71	Separador Caja
CIN-01-04	32,71	Separador Caja
CIN-01-04	32,71	Separador Caja
CIN-01-04	32,71	Separador Caja
CIN-01-05	14,37	Soporte microswitch eje z(inferior)
CIN-01-06	14,37	Soporte microswitch eje z(superior)
CIN-01-07	4,25	Pieza microswitch
CIN-01-07	4,25	Pieza microswitch
CIN-01-08	33,17	Soporte cadena portacables
CIN-01-09	38,92	Escuadra unión
CIN-01-09	38,92	Escuadra unión
CIN-01-10	908	Soporte superior ejes XY
CIN-01-11	144,8	Soporte Rodamiento
CIN-01-12	102,7	Soporte Motor Eje Y
CIN-01-13	262	Soporte lateral motor eje Y
CIN-01-14	343,2	Soporte motor eje X
CIN-01-15	258	Soporte lateral Rodamiento eje Y
CIN-01-16	87	Eje rodamiento eje Y
CIN-01-17	131	Soporte sensor 1
CIN-01-18	181	Soporte sensor 2
CIN-01-19	5	Soporte microswitch eje Y
CIN-01-20	70	Soporte cables sensor
<b>PESO CHAPA TOTAL(g)</b>	4194,79	

Tabla 2.15. Peso de chapa del modulo

<b>COMPONENETES</b>	<b>PESO(g)</b>
Caja eléctrica Rittal	3630
Modulo lineal Unimotion	7800
Reductor planetario eje z	1800
Reductor planetario eje y	1600
Reductor planetario eje x	850
Motor eje z	2000
Motor eje y	1100
Motor eje x	450
Acoplamiento con campana	300
Rodamiento	650
Caja para borneras	101
Microswitches	40
Portacables	540
Canaleta	20

Sensor	2000
Peso tornillería aprox.	600
Peso cables aprox.	600
Peso electrónica aprox.	700
<b>PESO COMPONENTES TOTAL(g)</b>	<b>24781</b>

Tabla 2.16. Peso de los componentes comerciales

Peso total de la chapa	(g)	4194,79
Peso total de los componentes	(g)	24781
<b>PESO TOTAL DEL MODULO DE INSPECCIÓN</b>	<b>(g)</b>	<b>28275,79</b>

Tabla 2.17. Peso total del módulo de inspección

Chapa anterior	5842,69
Acoplamiento con campana	300
Caja eléctrica Rittal	2930
Rodamiento	630
Reductor planetario eje z	1800
Caja para borneras	101
Microswitches	50
Portacables	540
Modulo lineal Unimotion	7800
Peso total tornillería	700
Reductora	1600
Reductora	1600
Motorn17	800
Motorn23	1500
Motorn34	4500
Sensor	2000
Elementos electrónica	800
<b>TOTAL</b>	<b>(g) 34.093,69</b>

Tabla 2.18. Peso total del módulo anterior

Revisando los valores de las tablas anteriores, se evidencia una disminución en el peso del módulo de 5,12 kg lo que es equivalente a un 15% menos.

Los planos detallados para todo el proyecto pueden ser vistos en la sección de Anexos - PLANOS MECÁNICOS

## 2.5. Análisis estático (Ensayo MEF)

Se realizaron una serie ensayos MEF por medio del programa Fusion 360 con el objetivo de validar las piezas diseñadas, comprobando así, su seguridad ante posibles intentos de forzado. Solo fueron analizadas las piezas que se considera, puedan llegar a presentar deformaciones o esfuerzos elevados.



### 2.5.1. BULÓN

Este elemento es el encargado de sostener uno de los soportes laterales del sistema XY con rodamiento, por lo cual estará expuesto a un esfuerzo de flexión. Se asignó como restricción el final del eje donde estará sujeto al rodamiento, mientras que la fuerza estará ubicada al inicio del eje y en los orificios donde estarán los tornillos.

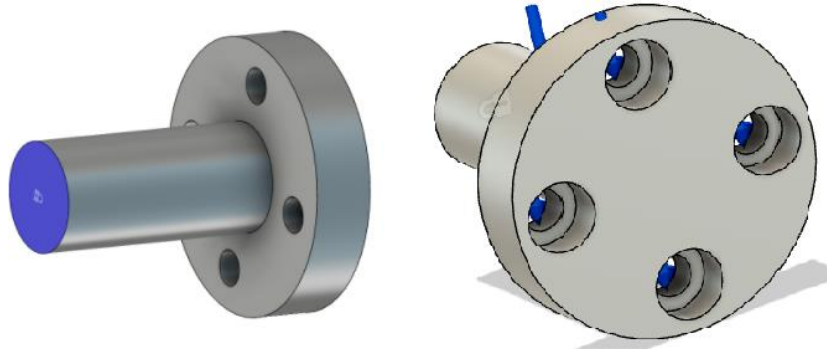


Figura 2.37. Restricciones y fuerzas en el bulón.

Para la simulación se consideró una magnitud de 60N y un tamaño medio de 10% del tamaño del modelo.

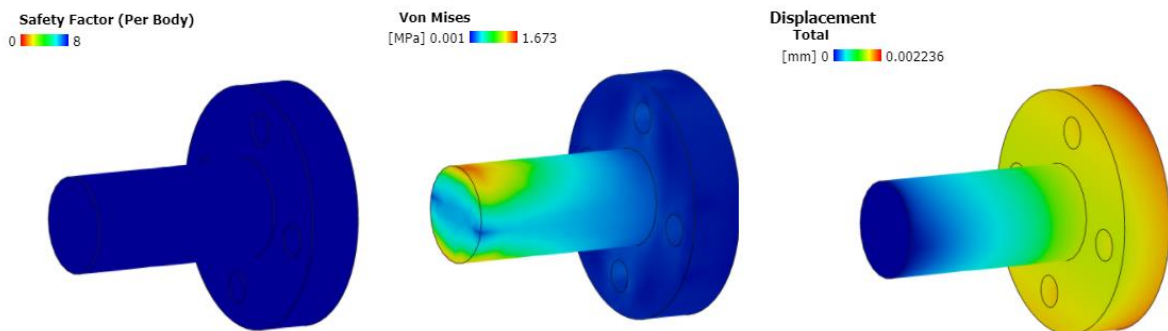


Figura 2.38. Resultados análisis MEF bulón.

Como se puede comprobar, el material soporta la carga de 60N con un factor de seguridad mínimo de 8, la sollicitación mayor es entorno a los 1.67 MPa y el desplazamiento máximo es alrededor de 0.0022mm. Estos valores son más que suficientes para asegurar la funcionalidad de esta pieza, ya que la tensión se encuentra muy distante del límite elástico del aluminio, el desplazamiento y factor de seguridad presentan cifras optimas que no afectaran su funcionamiento.

### 2.5.2. SEPARADORES

En estas piezas también se espera que haya esfuerzo de flexión. Como carga para la simulación, se definió un peso total de 50N, pero dado que estará distribuido en cuatro elementos, esta cifra será de 12,5 para cada uno. Se asignó uno de los extremos como restricción mientras el lado opuesto soportara la carga.

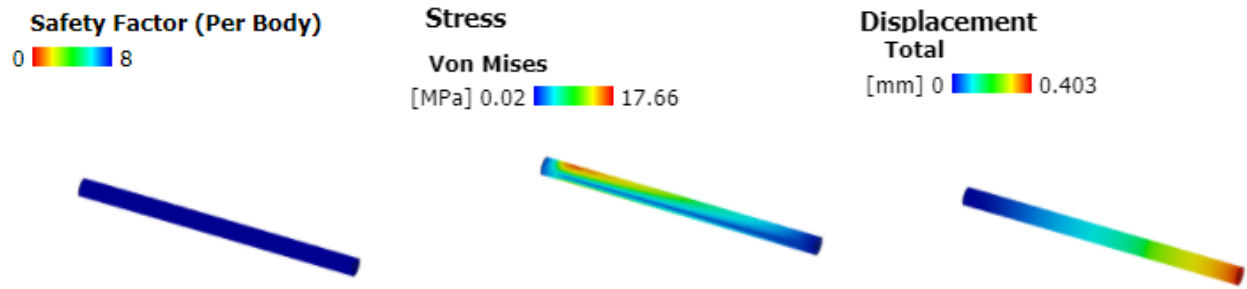


Figura 2.39. Resultados análisis MEF separadores.

El elemento soporta la carga de 12.5N con un factor de seguridad mínimo de 8, la sollicitación mayor es entorno a los 17.66 MPa y el desplazamiento máximo es alrededor de 0.4mm. Estos valores son más que suficientes para asegurar la funcionalidad de esta pieza, la tensión al igual que en la pieza anterior se encuentra muy distante del límite elástico del aluminio y aunque el desplazamiento en este caso es mayor, no es relevante para la función por la cual fue diseñada.

### 3. DISEÑO ELECTRÓNICO

El funcionamiento electrónico de este proyecto ha sido pensado para que actúe de forma modular, es decir, se tiene un controlador principal con una tarjeta de comunicación y cada motor contará con su respectiva placa controladora, con esto se espera favorecer las funciones de instalación y mantenimiento del módulo.

Según la solución existente en la empresa, se utiliza como controlador principal la placa de desarrollo Teensy, conectada con una extensión EtherCAT para ejecutar la comunicación entre módulos y ordenador, así mismo, se utiliza una placa adicional Powerstep para realizar el control de los motores.

En la empresa se diseñará un nuevo circuito impreso que tendrá incluido las conexiones para los puntos mencionados anteriormente, con lo cual el diseño electrónico para esto proyecto se limita al desarrollo de la placa controladora para los motores paso a paso. En este apartado se analizará todo lo relacionado con el diseño y selección de los componentes para la fabricación del controlador de los motores. Se dará inicio considerando las condiciones para la placa y los diseños ya existentes creados por la empresa.

La comunicación del módulo preliminar entre maestro (ordenador) y esclavos (módulos de inspección), es llevada a cabo bajo el protocolo EtherCAT, mientras que la Teensy intercambia mensajes con los controladores de los motores para configurarlos y ordenar los movimientos en los actuadores, siendo así, se comunican mediante el estándar SPI y se ha determinado que existen problemas de comunicación entre estos dos últimos, debido a la sensibilidad de este protocolo ante el ruido eléctrico, por ende se buscará diseñar una placa controladora que no utilice comandos SPI para ejecutar mandos de operación de los motores, sino que estos movimientos sean controlados mediante pulsos.

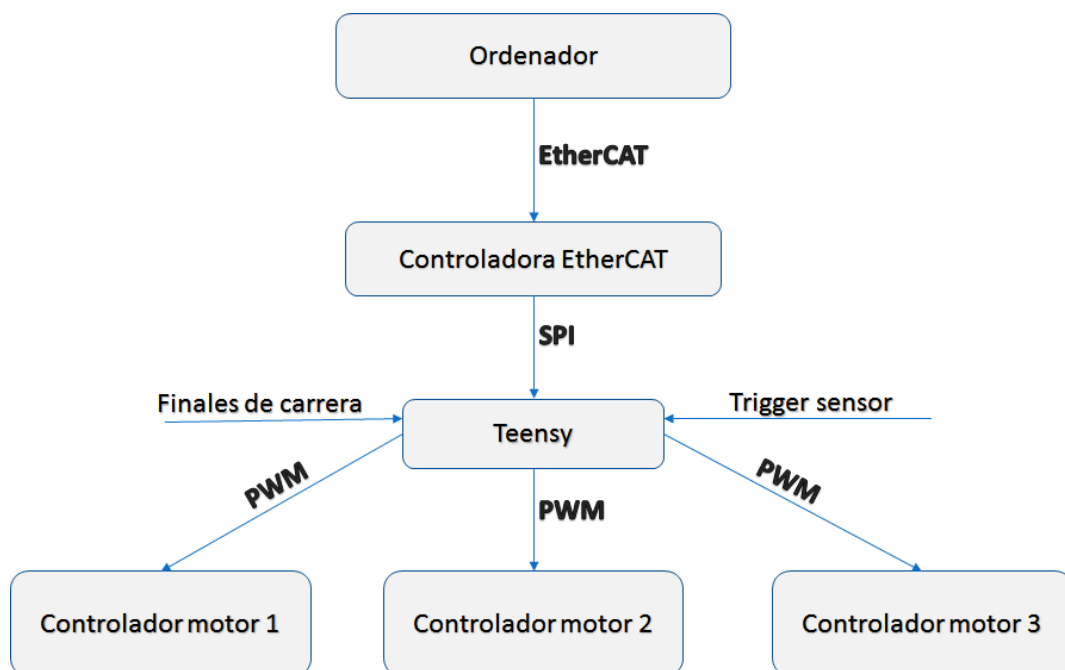


Figura 3.1. Diagrama electrónico del módulo

Con esto no se espera solucionar el problema al 100%, pero se estima que se reduzcan los fallos por comandos SPI alterados por el ruido, ya que en caso de verse alterada alguna señal de movimiento del motor, se perderán o se ganarán pulsos, hecho que es cuantiosamente mejor a recibir una instrucción completa de forma errónea. En el momento de definir el diseño del PCB, se intentará cubrir la mayor área posible de la placa con planos de tierra y de potencia, reservando,

si posible, una capa para el plano de tierra y otra para el plano de potencia, como una solución ante posibles ruidos.

En cuanto a las dimensiones, según versiones preliminares de la nueva PCB diseñada, se podrá contar con un largo de hasta 40mm por 40mm de alto.

### 3.1. Teensy

La Teensy es una placa de desarrollo con numerosas funciones, diseñada por PJRC y previamente cargada con un gestor de arranque. Esto permite la fácil programación usando conexión USB en placa sin necesidad de un programador externo. Teensy se puede programar en C o mediante el IDE de Arduino instalando el complemento Teensyduino. Dentro de su línea de productos se encuentran dos referencias que podrán ser usadas para la puesta en marcha del módulo de inspección.

Los dos modelos que se tienen pensados para ser el controlador principal del módulo, son la versión 3.6 y la 4.1. Estas dos referencias comparten las mismas dimensiones y tienen un pinout muy similar, por lo que es posible un diseño del circuito impreso estándar para los dos modelos.

	<b>Teensy 3.6</b>	<b>Teensy 4.1</b>
<b>Especificaciones</b>	ARM Cortex-M4 a 180MHz	ARM Cortex-M7 a 600MHz
	1024 Flash, 256K RAM,4K EEPROM	7936 Flash, 1024K RAM,4K EEPROM
	USB device 12 Mbit/sec, USB host 480 Mbit/sec	USB device 480 Mbit/sec & USB host 480 Mbit/sec
	64 Entradas digitales/pines de salida, 22 pines de salida PWM	55 Entradas digitales/pines de salida, 35 pines de salida PWM
	25 pines de entrada analógicos, 2 pines de salida analógicos, 11 pines de percepción capacitiva	18 pines de entrada analógicos
	6 puertos serial, 3 puertos SPI, 4 puertos I2C	8 puertos serial, 3 puertos SPI, 3 puertos I2C

Figura 3.2. Teensy 3.6 vs Teensy 4.1

Se puede ver claramente que la Teensy 4.1 tiene mejores prestaciones, pero aun así la versión 3.6 es tenida en cuenta para el diseño. Esto se debe a que en el momento de la programación se ha encontrado una librería que esta optimizada para esta referencia y es altamente eficiente para controlar motores paso a paso, esto será discutido en el apartado de Programación.



Figura 3.3. Teensy 4.1 [17].

Según el Layout preliminar del nuevo diseño del circuito impreso, las conexiones de la Teensy estarán dispuestas como se muestra a continuación:

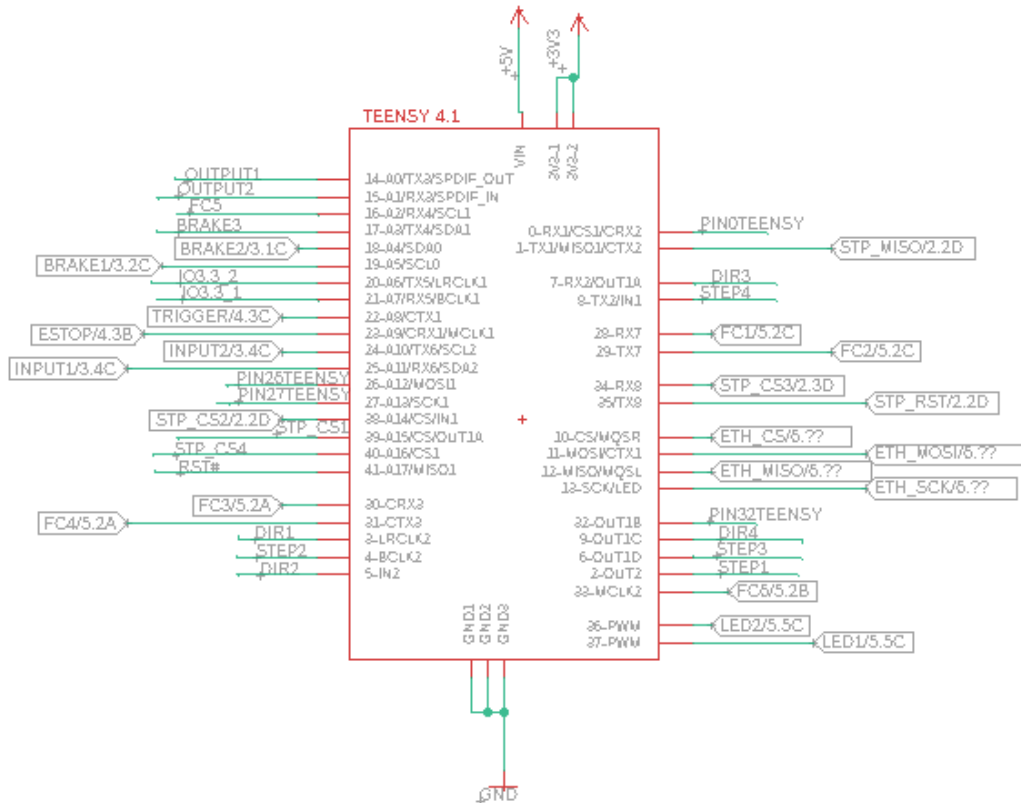


Figura 3.4. Layout Teensy.

Para controlar cada motor se necesitan dos pines, uno para indicar la cantidad de pasos y otro que indique la dirección, los pines disponibles en la Teensy para esto serán los marcados del dos al nueve, en la siguiente disposición.

Disposición de pin	Numero de pin
Step1	2
Dir1	3
Step2	4
Dir2	5
Step3	6
Dir3	7
Step4	8
Dir4	9

Tabla 3.1. Pines para el control de los motores

Como se puede observar en la anterior tabla, se dispone de pines para lo que se supondría es un cuarto motor, esta una propuesta adicional a los objetivos iniciales y se detallará más adelante.

### 3.2. Controlador DRV8711

En la búsqueda de un controlador adecuado para esta aplicación, se encontró y seleccionó el dispositivo DRV8711 del fabricante Texas Instruments. Este es un controlador de motor paso a paso que utiliza MOSFETs de canal N externos para accionar un motor paso a paso bipolar o dos

motores de CC con escobillas. Lleva integrado un indexador de micropasos, que es capaz de realizar modos de paso desde el paso completo hasta el paso 1/256.

El control del motor con este controlador se realiza mediante una sencilla interfaz paso/dirección o PWM que permite una fácil interconexión con los circuitos de control. Se utiliza una interfaz serie SPI para programar el funcionamiento del dispositivo. La corriente de salida (par), el modo de paso, el modo de decaimiento y las funciones de detección de bloqueo son programables a través de una interfaz serie SPI, a diferencia del módulo anteriormente usado, este controlador solo utilizará comandos recibidos por SPI al inicio de la operación para programar el chip, por ende, se elimina la posibilidad de ejecutar movimientos involuntarios que puedan afectar la integridad de alguno de los elementos del módulo, ocasionados por ruido eléctrico.

El controlador DRV8711 está empaquetado en un paquete DCP de 38 pines y cuenta con funciones de apagado interno para proporcionar protección contra sobrecorrientes, protección contra cortocircuitos, bloqueo por subtensión y sobretemperatura. Estas condiciones de fallo se indican a través de un pin FAULTn, y cada condición de fallo se informa a través de un bit dedicado por medio de SPI.

Como se menciona directamente en la hoja de datos de este dispositivo, se utilizarán transistores MOSFET externos y se procederá con el diseño del circuito impreso según las recomendaciones dadas por el fabricante, evitando así funcionamientos erróneos.

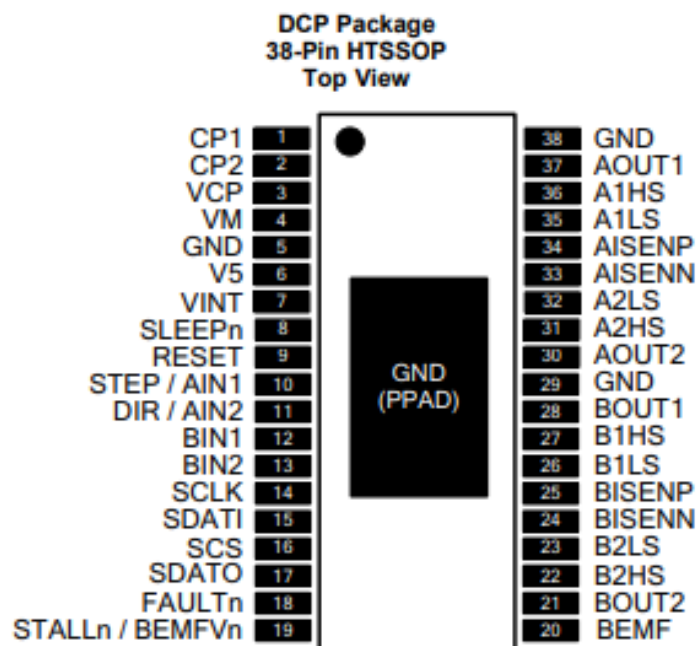


Figura 3.5. Configuración de pines DRV8711 [18].

### 3.3. Transistores MOSFET

Un MOSFET es un dispositivo semiconductor utilizado para la conmutación y amplificación de señales. Los MOSFETs son componentes electrónicos que permiten controlar corrientes muy elevadas. Como en el caso de los transistores comunes, tienen tres terminales de salida que se denominan: Drain, Source y Gate (D, S y G). La corriente principal pasa entre Source y Drain ( $I_{ds}$ ) mientras que el control de esta corriente se obtiene aplicando una tensión sobre el terminal Gate (respecto al terminal Source), conocida como  $V_{gs}$ .

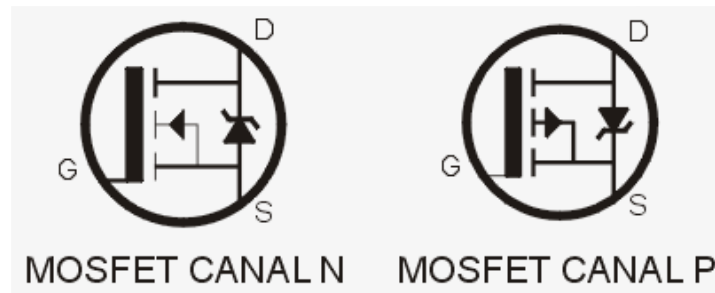


Figura 3.6. Símbolos de los MOSFET [19].

Con base en la aplicación del módulo, los MOSFETs se usarán como interruptores digitales de potencia, estos trabajan en corte (OFF) o saturación (ON). Para llevar un MOSFET a la saturación, es necesario que la tensión de control en el terminal Gate sea suficientemente alta y esto podría ser un problema si se usa directamente la baja tensión de salida de un microcontrolador. Es más, incluso si se alcanza este valor, no sería suficiente porque se debería salir de la región lineal de trabajo para llevarlo a la saturación. Si no fuera así, la conducción no sería plena y por lo tanto parte de la potencia se disiparía en el MOSFET en forma de calor porque la potencia disipada por el transistor es el resultado de la multiplicación entre la caída de tensión y la corriente que pasa por el ( $P_{mosfet} = V_{ds} * I_{ds}$ ) [19].

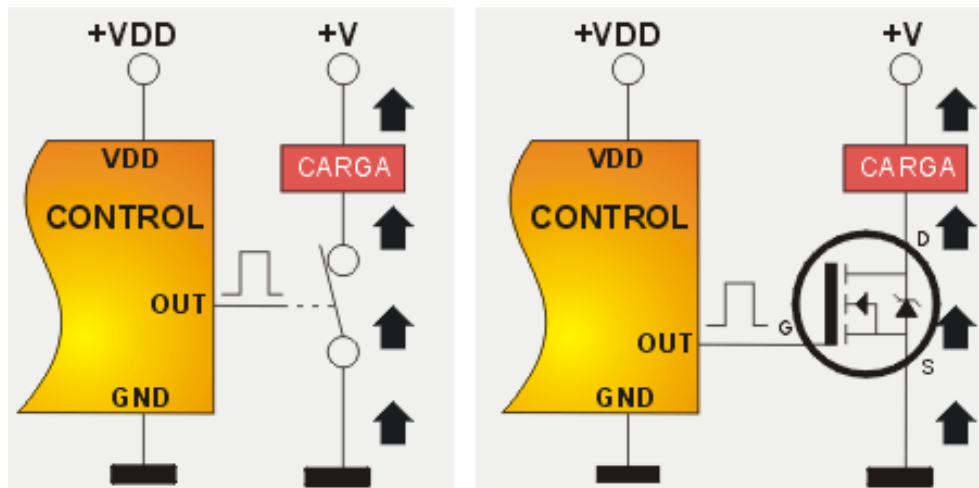


Figura 3.7. Aplicación de MOSFET como interruptor de potencia [19].

Por lo tanto, escoger un MOSFET de tipo "logic level" es la mejor elección para trabajar con este circuito. Para el propósito de este proyecto se hará uso de estos transistores en la interfaz de potencia, así como para proteger el circuito.

### 3.4. Interfaz de potencia

Dentro de los parámetros que se consideraron al seleccionar un MOSFET de nivel lógico para la interfaz de potencia, se enumeran los siguientes:

#### 3.4.1. TENSIÓN UMBRAL DEL GATE AL SOURCE - $V_{GS(TH)(MIN)}$ Y $V_{GS(TH)(MÁX.)}$

La tensión de la compuerta en el valor umbral mínimo o por debajo de este valor apaga el MOSFET. La tensión de la compuerta por encima del valor umbral máximo enciende el MOSFET. La tensión umbral de la compuerta entre el valor mínimo y el máximo podrían encender o apagar el MOSFET y deben evitarse. [20]

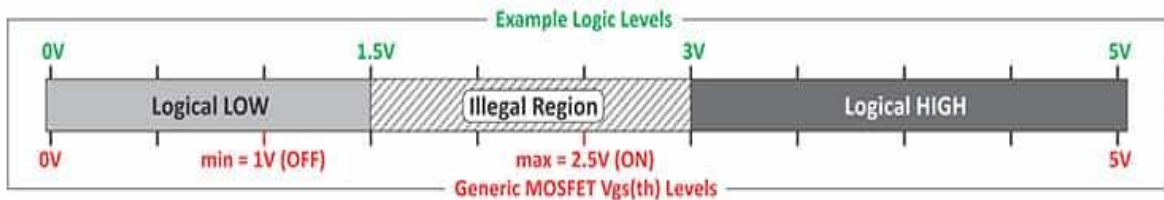


Figura 3.8. Valores lógicos de ejemplo para la activación del MOSFET [20].

### 3.4.2. RESISTENCIA EN CONDUCCIÓN DEL DRAIN AL SOURCE - $R_{DS(ON)}$

Cuando se enciende el MOSFET, hay una resistencia entre el Drain y el Source que disminuye mientras que la tensión de la compuerta al Source o el  $V_{gs}$  aumenta. Se debe escoger un MOSFET cuyos valores de  $R_{ds(on)}$  más bajos ocurran dentro del valor de alta tensión lógico ideal o cerca de este valor y no disminuyan substancialmente a medida que aumenten los valores del  $V_{gs}$ .

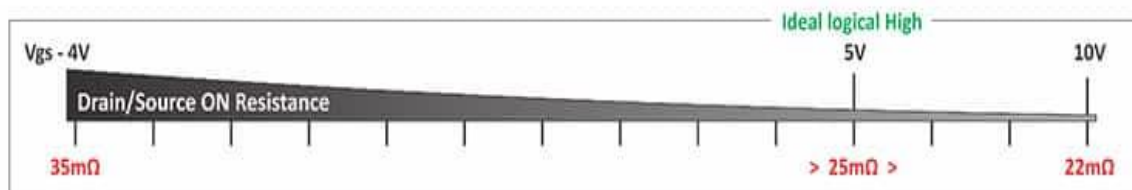


Figura 3.9. Valores  $R_{ds(on)}$  de ejemplo en la activación del MOSFET [20].

### 3.4.3. CORRIENTE DE DRENAJE - $I_D$

Indica la capacidad de conducción de corriente del transistor, se puede utilizar como guía al comparar diferentes dispositivos. Sin embargo, no se debe permitir que la corriente del Drain máxima nominal fluya hacia el chip.

En la práctica, la corriente del Drain permitida está limitada por la capacidad de corriente del paquete del dispositivo, así como por la temperatura máxima del canal, el área de operación segura (SOA) y otras características de rendimiento del chip.

### 3.4.4. TENSIÓN EN CONDUCCIÓN DEL DRAIN AL SOURCE - $V_{DS}$

Una vez el MOSFET ha recibido la  $V_{gs}$  necesaria para entrar en la región de saturación, este se comporta como un cortocircuito, y el valor de tensión presente entre el Drain y el Source es conducido hacia la carga, es decir, esta será la tensión con la cual se alimentarán los motores.

### 3.4.5. MOSFET TIPO N

Un MOSFET de canal N se enciende al aplicar una tensión positiva en el terminal del Gate. La tensión será mayor que el suministro de tensión positivo en el terminal Drain, mientras que la resistencia entre el extremo positivo y el Drain limitará la corriente. Para este tipo de MOSFET, el terminal Source deberá conectarse a tierra.

Un MOSFET de canal N es un tipo de transistor en el que el canal del MOSFET está compuesto por una mayoría de electrones como portadores de corriente. Cuando el MOSFET se activa y está encendido, la mayoría de la corriente que fluye son electrones que se mueven por el canal [21].

Una vez se conocen las especificaciones relevantes para escoger el MOSFET necesario y sabiendo los requerimientos eléctricos de los motores a utilizar, se elige un MOSFET de doble canal,



teniendo en cuenta que el valor de corriente máximo en los motores se encuentra en el eje Y y su valor es de 5A, mientras que la tensión de operación deseada es de 48V para todos los motores.

Característica		Símbolo	Valor		Unidad
Tensión Drain-Source		Vdss	60		V
Tensión Gate-Source		Vgss	±20		V
Umbral Tensión en Gate		Vgs(th)	Min. 1	Max. 2.5	V
Resistencia en conducción del Drain al Source		Rds(On)	Typ.	15	Vgs=10V
			Max	19.5	
			Typ.	21	Vgs=4.5V
			Max	28	
Corriente de Drain (Vgs=10V)	TA=+25°C	Id	7.6		A
	TA=+100°C		5.4		
Corriente de Drain (Vgs=4.5V)	TA=+25°C	Id	6.2		A
	TA=+100°C		4.1		

Tabla 3.2. Características MOSFET DMTH6016LSD

### 3.5. Protección contra polaridad inversa con Mosfet tipo P

Los circuitos de protección contra polaridad inversa evitan daños a las fuentes de alimentación y circuitos electrónicos en caso de que se aplique una tensión inversa en los terminales de entrada. La protección de polaridad inversa en esta placa, se implementará en la entrada del circuito impreso.

Para bloquear las tensiones negativas, se colocará un MOSFET de canal P en serie en la entrada de tensión del circuito electrónico. Un punto a favor de utilizar un MOSFET es que tienen resistencias muy bajas y, por lo tanto, disipan menos potencia, haciéndolos ideales para brindar protección de corriente inversa con una pérdida mínima.

El MOSFET tipo P se utiliza como un interruptor de alimentación que conecta o desconecta la carga de la fuente de alimentación. Durante la conexión adecuada de la fuente de alimentación, el MOSFET se enciende debido al Vgs correcto, pero durante la situación de polaridad inversa, el voltaje de Gate a Source es demasiado bajo para encender el MOSFET y desconecta la carga de la fuente de alimentación de entrada.

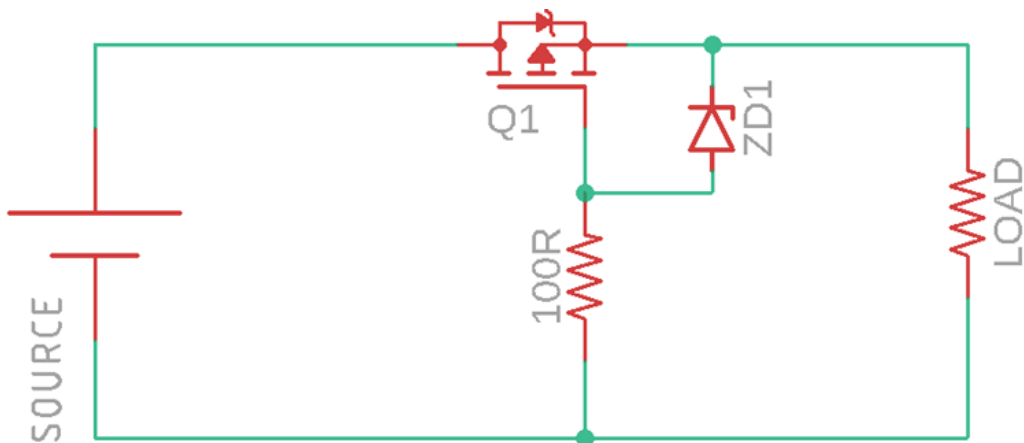


Figura 3.10. Circuito de protección de polaridad inversa [22].

Para evitar daños al Mosfet en el caso de usar una tensión superior a la que tolera, se usa un diodo Zener junto con una resistencia limitadora.

El valor de la resistencia debe elegirse de manera que no sea lo suficientemente alta como para no sobrecalentar el Zener, pero lo suficientemente baja para proporcionar una corriente de polarización Zener adecuada y descargar la puerta rápidamente si la tensión de suministro se invierte repentinamente. En este caso, no hay posibilidades de una tensión inversa repentina durante el funcionamiento continuo del circuito, por lo cual se considera seguro usar un valor de resistencia de 100k.

Cada MOSFET viene con una  $V_{gs}$ , si esta tensión aumenta por encima del valor máximo admitido, esto puede dañar el MOSFET. Por lo tanto, se elige un diodo Zener cuya tensión no excede el voltaje del Gate del MOSFET. Para un valor  $V_{gs}$  de 10V, un diodo Zener de 8V será suficiente. Al igual que cuando se eligió el MOSFET tipo N, se tomaron en cuenta los requerimientos necesarios y fue escogido un MOSFET tipo P con las características presentes en la Tabla 3.3.

Característica		Símbolo	Valor		Unidad
Tensión Drain-Source		$V_{dss}$	-60		V
Tensión Gate-Source		$V_{gss}$	±20		V
Umbral Tensión en Gate		$V_{gs(th)}$	Min. -1	Max. -3	V
Resistencia en conducción del Drain al Source		$R_{ds(On)}$	Max	28	$V_{gs}=-10V$
			Max	35	$V_{gs}=-4.5V$
Corriente de Drain ( $V_{gs}=10V$ )	$T_A=+25^{\circ}C$	Id	-7.8		A
	$T_A=+70^{\circ}C$		-5.8		
Corriente de Drain ( $V_{gs}=4.5V$ )	$T_A=+25^{\circ}C$	Id	-6.4		A
	$T_A=+70^{\circ}C$		-4.5		

Tabla 3.3. Características MOSFET DMP6023LE-13

### 3.6. Layout del circuito eléctrico

El circuito impreso de los motores combina el controlador de motor paso a paso DRV8711 de Texas Instruments con MOSFETs externos para permitir la manipulación de los motores bipolares paso a paso escogidos para este proyecto. Cuenta con voltajes de funcionamiento de 8V a 60V. El rendimiento de potencia del controlador va en función de los puentes H externos, que permiten que el controlador entregue corrientes continuas de hasta 6.2A por fase sin ningún tipo de enfriamiento adicional, como disipadores de calor o flujo de aire forzado. La lógica de conexionado se ilustra a continuación:

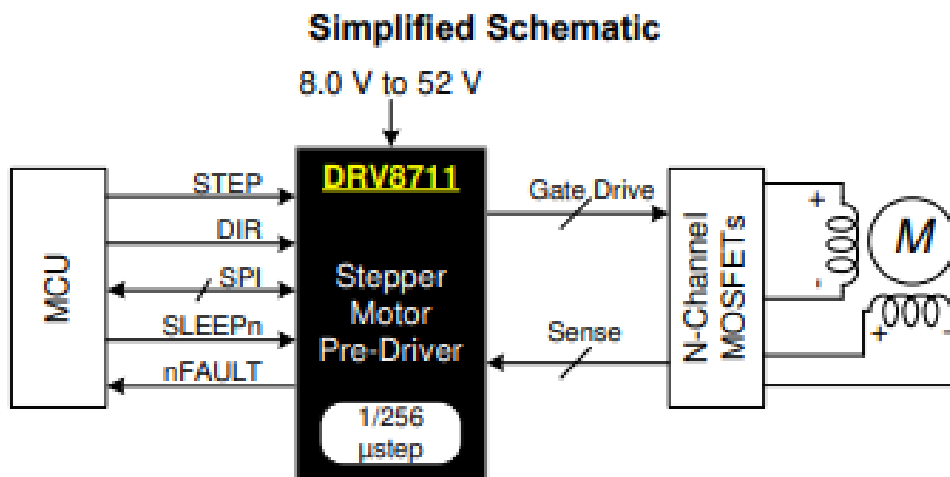


Figura 3.11. Esquema de conexión para el controlador de los motores. [23]

El diseño del Layout se hizo teniendo en cuenta las instrucciones dadas por el fabricante del circuito integrado DRV8711, cuyas directrices serán enunciadas a continuación:

- El pin VM debe conectarse con GND utilizando condensadores cerámicos de baja ESR (resistencia serie equivalente) con un valor recomendado de  $0,01\mu\text{F}$  para VM. Este condensador debe colocarse lo más cerca posible del pin VM con una traza gruesa o conexión de plano de tierra al pin GND del dispositivo. El pin VM debe ser derivado a tierra utilizando un condensador de masa adecuado. Este componente puede ser electrolítico y debe estar situado cerca del DRV8711.
- Entre los pines VM y VCP debe colocarse un condensador cerámico de baja ESR. Texas Instruments recomienda un valor de  $1\mu\text{F}$  de 16 V. Este componente debería estar lo más cerca posible de los pines.
- Debe colocarse un condensador cerámico de baja ESR entre los pines CP1 y CP2. Texas Instruments recomienda un valor de  $0,1\mu\text{F}$  para VM. Este componente debería estar lo más cerca posible de los pines.
- VINT debe ser conectado a GND con un condensador cerámico de  $1\mu\text{F}$  con un valor nominal de 6,3V. Este condensador debe estar posicionado lo más cerca posible del pin.
- Se debe conectar V5 a GND con un condensador cerámico de  $1\mu\text{F}$  de 10V. Este condensador debería estar lo más cerca posible de los pines.

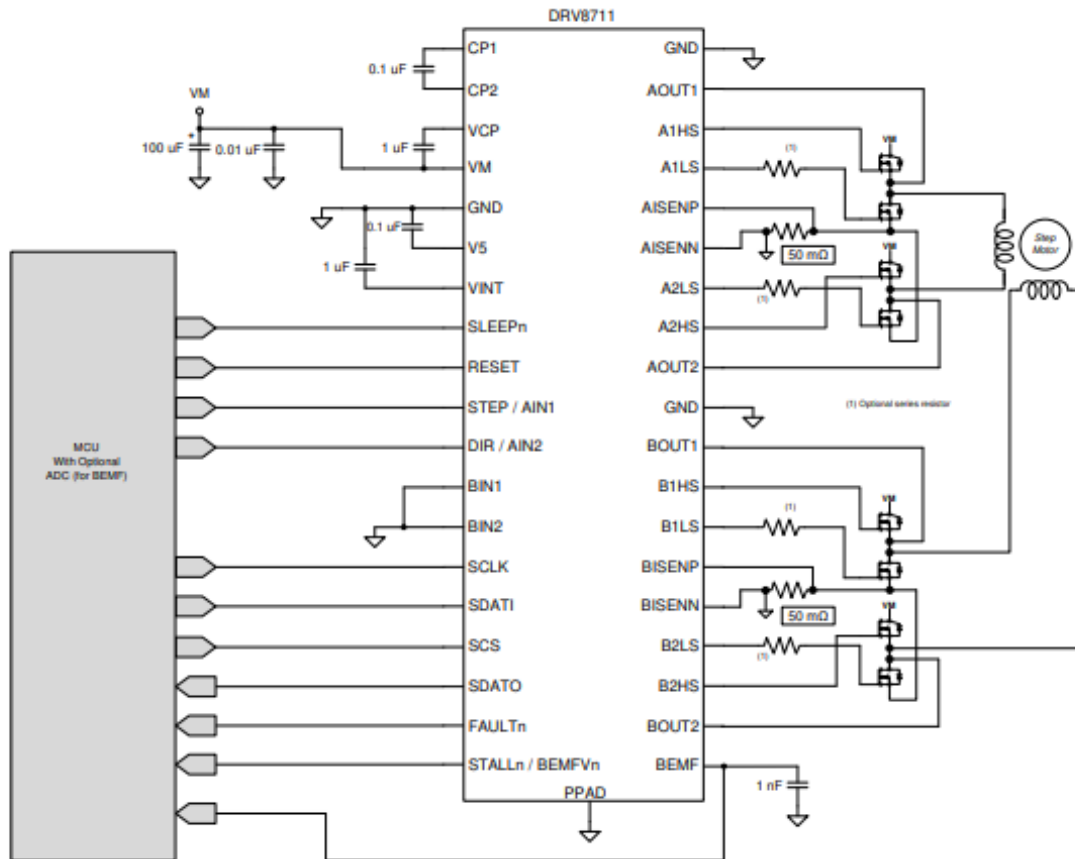


Figura 3.12. Esquemático de aplicación típica según T.I. [23].

El Layout de la tarjeta controladora de los motores fue realizado teniendo como base el ejemplo brindado por el fabricante, siendo así, se incluyó el chip DRV8711 y los elementos cuyos valores recomendados se mencionaron anteriormente, así como los elementos de potencia y su respectiva protección.

Para realizar el diseño de este Layout y su posterior circuito impreso, se utilizó el software EAGLE de Autodesk y se añadieron las librerías adicionales necesarias para poder incluir todos los elementos electrónicos necesarios en este diseño. En la siguiente figura se enseñan las conexiones del controlador junto con etiquetas para facilitar su diseño y visualización.

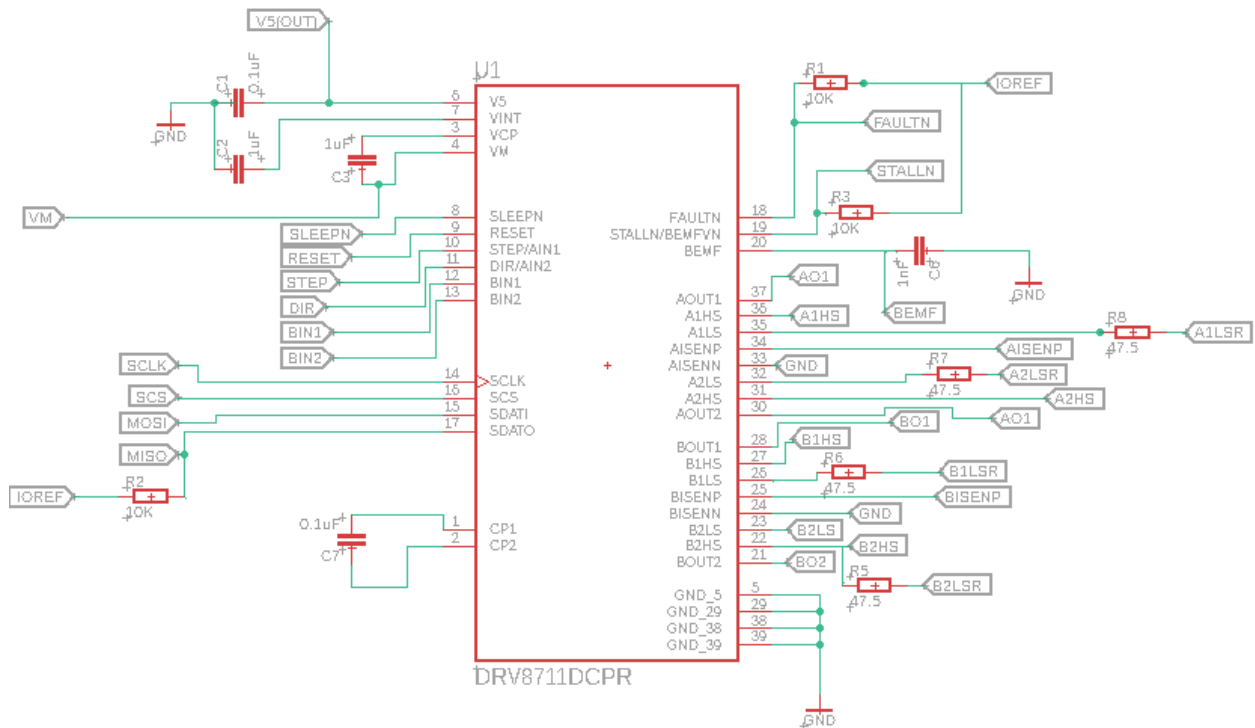


Figura 3.13. Layout DRV8711.

El circuito de protección contra polaridad inversa incluye condensadores de desacoplamiento y de bypass recomendados por el fabricante y también resultan favorables al momento de usar el controlador con altas frecuencias.

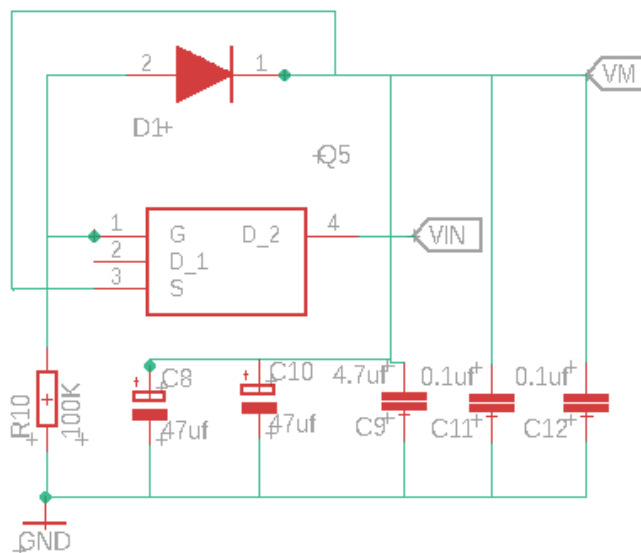


Figura 3.14. Protección de polaridad inversa para el controlador

Dado que el circuito integrado para los MOSFETs cuenta con una configuración dual, se necesitan cuatro de estos dispositivos para controlar un motor. Como los motores seleccionados son bipolares, se definen cuatro transistores en una configuración de puente H para cada bobina. Hay incluidas también resistencias de detección de corriente, estas están diseñadas para tener una baja resistencia y así minimizar el consumo de energía. Como resultado, la resistencia calibrada detecta la corriente que fluye a través de ella en forma de una caída de tensión que es detectada y supervisada por el circuito de control.

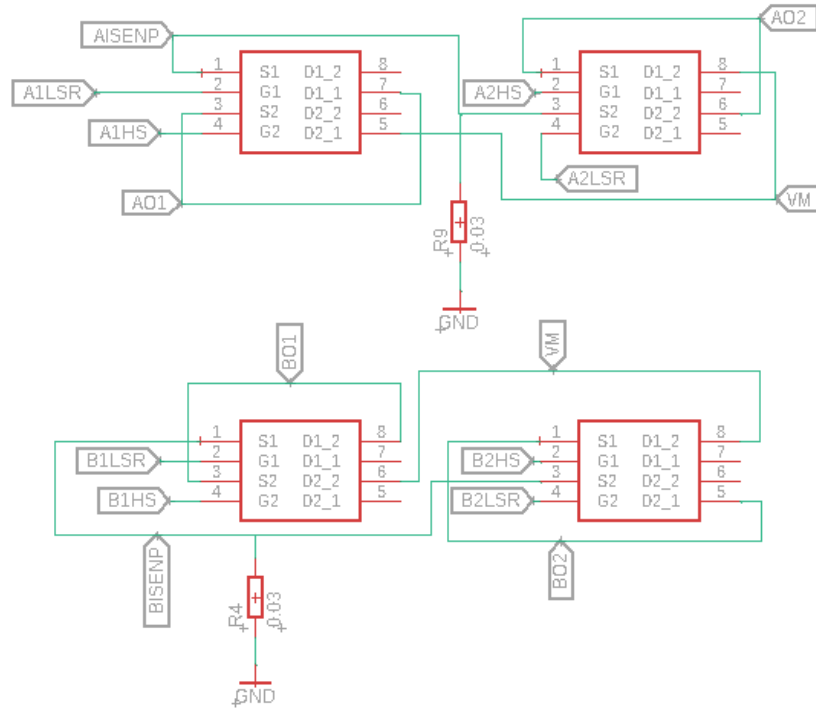


Figura 3.15. Puente H con MOSFETs.

Por último, se incluyen los elementos físicos donde se conectará la tarjeta diseñada con la tarjeta principal del módulo donde se encuentra la Teensy.

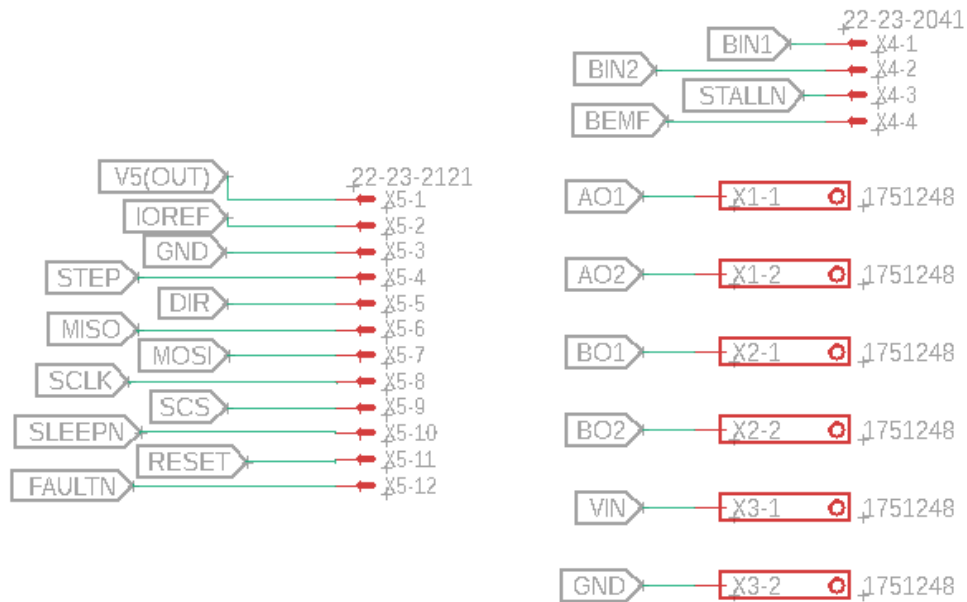


Figura 3.16. Conectores del circuito impreso.

### 3.7. Diseño de la PCB

Para el diseño de las pistas se establecieron las siguientes reglas de diseño:

- Ancho de pista estándar: 0.16mm
- Vías de señales: 0.16mm
- Pad de señales: 0.16mm
- Separación entre pistas: 0.26mm
- Grosor de la PCB: 1.6mm

La distribución de todos los componentes ha sido seleccionada con el objetivo de que estos cumplan en mayor medida las recomendaciones dadas por el fabricante.

Por esta razón en la cara inferior se ha situado un plano de masa y los condensadores electrolíticos se encuentran cercanos al pin de VM. El condensador entre VM y VCP se encuentra lo más próximo posible a los pines de DRV8711. El condensador cerámico entre CP1 y CP2 está junto a sus respectivos pines 2 y 3. Los condensadores de VINT y V5, por motivos de espacio no pudieron ser posicionados junto a los pines que van conectados, pero aun así se encuentran cercanos a estos.

Con respecto a los MOSFETs, dado que pueden llegar a ser una fuente de calor, se decidió dejarlos lo más apartado posible del controlador. Los conectores al controlador principal del módulo fueron puestos respetando el orden de la PCB de este y se espera que la ubicación de los conectores para los motores facilite la conexión al momento de la instalación. El tamaño final de la PCB es de 40x35mm.

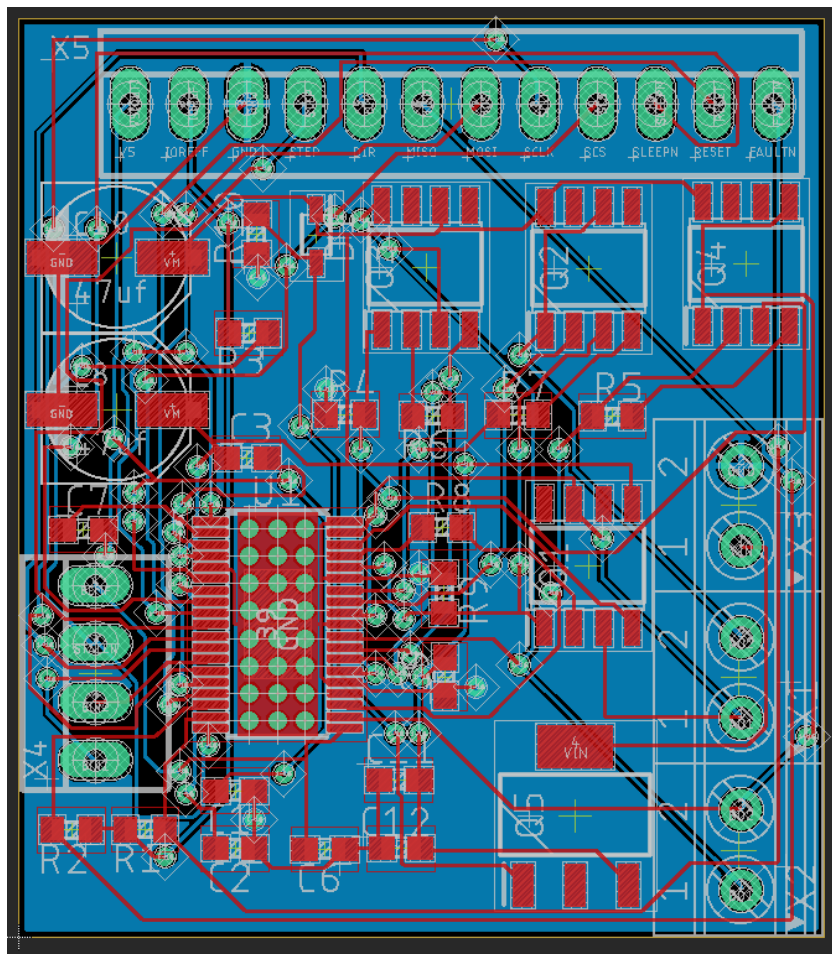


Figura 3.17. Esquema de pistas.

La configuración de los pines y sus funciones están reflejados en la siguiente tabla:

<b>PIN</b>	<b>Descripción</b>
VIN	8V-60V conexión de alimentación de la placa
VM	Este pin da acceso a la fuente de alimentación del motor después del MOSFET de protección contra polaridad inversa. Se puede utilizar para suministrar energía con protección inversa a otros componentes del sistema.
GND	Punto de conexión a tierra para la fuente de alimentación del motor y la referencia de tierra del control. La fuente de control y el controlador del motor deben compartir una tierra común.
AOUT1	Salida del motor: Extremo "positivo" de la fase en la bobina A.
AOUT2	Salida del motor: Extremo "negativo" de la fase en la bobina A.
BOUT1	Salida del motor: Extremo "positivo" de la fase en la bobina B.
BOUT2	Salida del motor: Extremo "negativo" de la fase en la bobina B.
V5 (OUT)	Salida regulada de 5 V: esta patilla da acceso a la tensión del regulador interno del DRV8711. El regulador sólo puede proporcionar hasta 10mA. En general, no está pensado para alimentar dispositivos externos.
IOREF	Todas las salidas de señal de la placa (excepto BEMF) son salidas de colector abierto que se derivan a IOREF, por lo que este pin debe ser alimentado con el voltaje lógico del sistema de control (por ejemplo, 3,3 V para su uso en sistemas de 3,3 V). Para mayor comodidad, puede conectarse a la patilla vecina V5 (OUT) cuando se utilice en un sistema de 5 V.
STEP	Los cambios en esta entrada modifican la corriente del motor un paso hacia arriba o hacia abajo.
DIR	Entrada que determina el sentido de giro del motor paso a paso.
MISO	Salida de datos SPI.
MOSI	Entrada de datos SPI.
SCLK	Entrada de reloj SPI
SCS	Entrada de selección de chip SPI
SLEEP	Por defecto, el controlador pone este pin a cero, lo que lo pone en un modo de reposo de bajo consumo. El controlador del motor se desactiva y todos los circuitos analógicos se colocan en un estado de bajo consumo. La circuitería digital sigue funcionando en modo de reposo, por lo que se puede acceder a los



	registros del dispositivo a través de la interfaz serie. Este pin debe ser conducido a un nivel alto para habilitar el dispositivo.
RESET	Entrada de reset del chip. Un nivel lógico alto en esta entrada reinicia toda la lógica interna, incluyendo el indexador y los registros del dispositivo, y desactiva las salidas del controlador. Nota: el pin RESET no funciona mientras el dispositivo está en modo de reposo.
FAULT	Salida que se pone en nivel bajo cuando se produce un fallo de sobrecorriente, sobretemperatura, baja tensión o en el precontrolador. Este pin se conecta a IOREF, lo que lo pone en alto por defecto.
BIN1	Este pin no es utilizado en modo indexador (es decir, cuando se utiliza este dispositivo como controlador de motor paso a paso).
BIN2	Este pin no es utilizado en modo indexador (es decir, cuando se utiliza este dispositivo como controlador de motor paso a paso).
STALL/BEMFV	Salida de colector abierto con pull up a IOREF en la placa. En el modo de detección de bloqueo interno, la salida se pone a bajo cuando se detecta el bloqueo. En el modo de detección de bloqueo externo, la salida se pone a nivel bajo cuando se dispone de una medición válida de EMF trasera.
BEMF	Salida analógica que representa el EMF trasero del motor. La señal de este pin puede ser procesada por un microcontrolador para implementar algoritmos más avanzados de control y detección de paradas.

*Tabla 3.4. Descripción de pines.*

En las siguientes figuras se observa el resultado final del circuito impreso, cabe aclarar que para la fabricación de estas placas se contara con el servicio de la empresa JLCPCB.

Gracias a la oferta de ensamble SMT (Surface mount), esta empresa no solo será la encargada de fabricar la PCB, sino que también realizará el ensamble automatizado de todos los elementos dentro del diseño realizado, proporcionando así un terminado de alta calidad y minimizando los costos de producción.

Para acceder a este servicio, fue necesario seleccionar elementos existentes dentro de la base de datos de esta empresa, así como la creación de archivos específicos para indicar los componentes a posicionar y sus coordenadas dentro de la PCB diseñada.

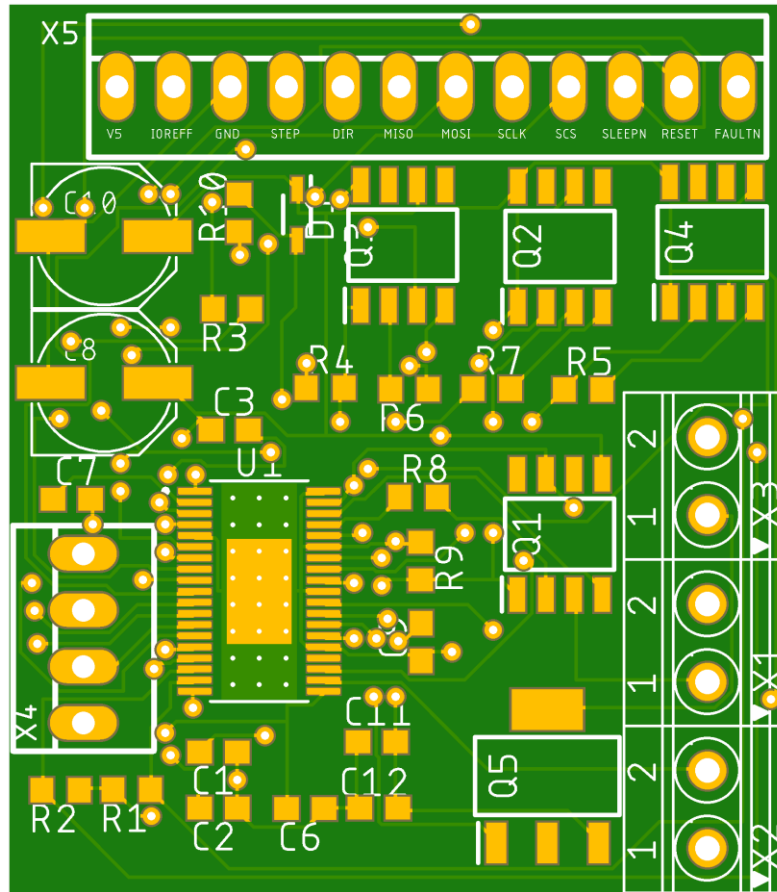


Figura 3.18. Cara superior de la PCB.

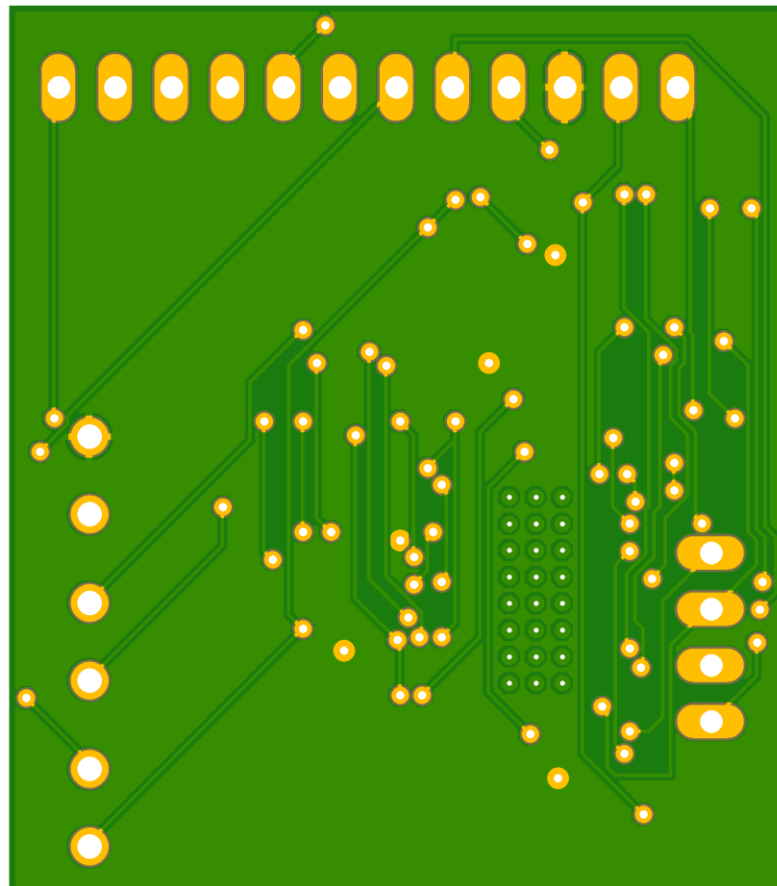


Figura 3.19. Cara inferior de la PCB.

## 4. PROGRAMACIÓN

La sección concerniente a la programación en este proyecto, corresponde a la definición de un programa base para configurar y controlar los motores y realizar la comunicación con un maestro y diferentes esclavos en una red de protocolo EtherCAT. Se estudiarán dos alternativas para entender en detalle cual puede brindar las mejores prestaciones.

El programa en la Teensy debe ser capaz de controlar el movimiento de los motores, mientras se está comunicando con los demás módulos y ordenador, para esto se debe tener en cuenta que estas dos funciones tendrían que funcionar en “paralelo”, ya que los tiempos de operación de cada función influyen negativamente en el trabajo de la función restante, esto sin tener en cuenta que la Teensy también debe estar pendiente de la información entrante proveniente de los microswitches y la seta de emergencia.

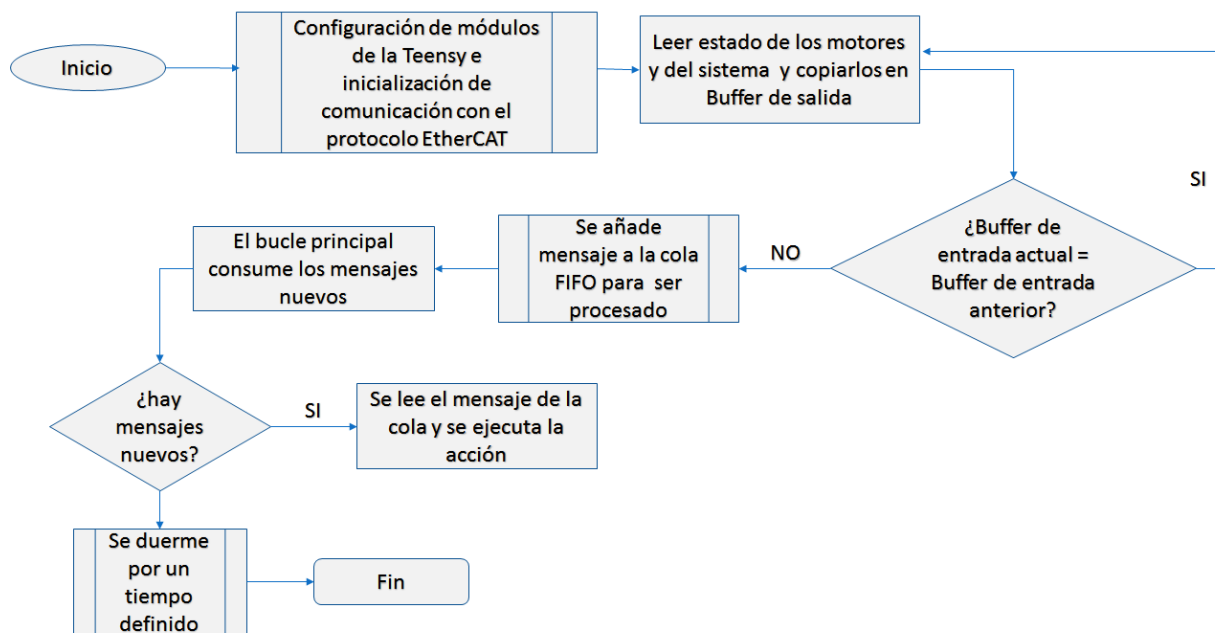


Figura 4.1. Diagrama de flujo del programa.

El actual programa desarrollado por la empresa cuenta con clases y funciones ya definidas en las que la tarea EtherCAT se ejecuta como una interrupción generada por un temporizador, cuyo periodo se puede configurar. Esta tarea lee el estado actual de los motores y del sistema y lo escribe en el buffer de salida, que se enviará por el bus EtherCAT y copia en una cola FIFO, el buffer de entrada para ser procesado por el bucle principal si ha cambiado respecto al buffer recibido en el mensaje anterior. Se consideran los comandos persistentes por lo que si no hay cambio en el mensaje EtherCAT no se añade a la cola para el procesamiento posterior.

El bucle principal del firmware de la tarjeta Teensy consume los mensajes nuevos que se reciben por bus EtherCAT y que son incorporados en la cola de mensajes a procesar por la tarea EtherCAT. Si no hay mensajes disponibles en la cola esta tarea se duerme durante un tiempo mitad del periodo de refresco del bus EtherCAT.

Cuando hay un mensaje nuevo este se recupera de la cola y se obtiene el código del comando. En función del comando enviado se llama a la función que lo ejecuta.

Los microswitches para delimitar el movimiento y la seta de emergencia se gestionan a través de interrupciones. Se evita el uso de una comprobación periódica en la tarea principal ya que esta puede introducir retrasos debido a la ejecución de los comandos recibidos por la cola EtherCAT.

Para el funcionamiento de los motores, se han estudiado dos soluciones correspondientes a configuraciones distintas en cuanto a librerías y placas Teensy se refiere.

#### **4.1. Comunicación SPI**

El Bus SPI (del inglés Serial Peripheral Interface) es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos. El bus de interfaz de periféricos serie o bus SPI es un estándar para controlar casi cualquier dispositivo electrónico digital que acepte un flujo de bits serie regulado por un reloj (comunicación sincrónica) [24].

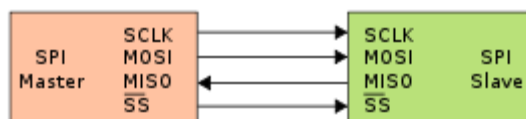


Figura 4.2. Comunicación SPI entre un maestro y un esclavo [24].

Este estándar de comunicaciones es usado para configurar los motores una sola vez al inicio del programa, por lo cual se prevé que el ruido proveniente del funcionamiento de los motores no influya en la configuración o durante su tiempo de trabajo. Este tipo de protocolo también es usado entre el chip EtherCAT y la Teensy, siendo este también protegido en el diseño de la nueva PCB, a cargo de la empresa.

#### **4.2. librería High power stepper**

En la tarjeta Teensy se utiliza la librería “High power stepper” que implementa todos los comandos y facilita el acceso a los registros de configuración del driver. Esta es una biblioteca para Arduino IDE que ayuda a interactuar con el controlador DRV8711. Utiliza la biblioteca Arduino SPI para comunicarse con la interfaz SPI (SCS, SCLK, MISO y MOSI) del controlador. Para ser usada en esta aplicación se modificó su archivo de configuración con el fin de utilizar el puerto 1 del SPI, ya que por defecto esta viene configurada para el puerto 0.

En esta se realiza la configuración del modo de decaimiento, el límite máximo de corriente de los motores y el número de micropasos o microsteps que corresponden a un paso completo de cada motor. Para programar estos campos se toma como referencia las recomendaciones del fabricante del chip DRV8711, así como las características de los motores.

##### **4.2.1.1. DECAIM MODE**

El DRV8711 admite tres modos de decaimiento diferentes: decaimiento lento, decaimiento rápido y decaimiento mixto. El DRV8711 también admite el modo de decaimiento mixto automático, que minimiza la ondulación de la corriente. La corriente que pasa por el bobinado del motor se regula mediante ajustes programables de supresión (TBLANK), decaimiento (TDECAY) y tiempo de desconexión (TOFF). Esto significa que después de cualquier fase de accionamiento, cuando la corriente del bobinado del motor alcanza el umbral de corte de corriente (Itrip), el DRV8711 ubicará el bobinado en los modos de decaimiento programados hasta que el ciclo haya expirado. Después, se inicia una nueva fase de accionamiento.

Durante la caída de corriente en el PWM, el puente H está habilitado para conducir a través del bobinado del motor hasta que el umbral de corte de corriente del PWM sea alcanzado. Esto puede ser visto en la Figura 4.3 en el punto 1, una vez que se alcanza el umbral de caída de corriente, el puente H puede operar en dos estados diferentes, decaimiento rápido o decaimiento lento.

En el modo de caída rápida, una vez alcanzado el nivel de caída de corriente PWM, el puente H invierte su estado para permitir que la corriente del bobinado fluya en dirección inversa. Los MOSFETs opuestos se encienden; cuando la corriente del bobinado se acerca a cero y el puente se desactiva para evitar cualquier flujo de corriente inversa. El modo de decaimiento rápido se muestra en Figura 4.3 en el punto 2.

En el modo de decaimiento lento, la corriente del devanado se recircula habilitando los dos MOSFETs del lado bajo en el puente. Esto se muestra en la Figura 4.3 en el punto 3.

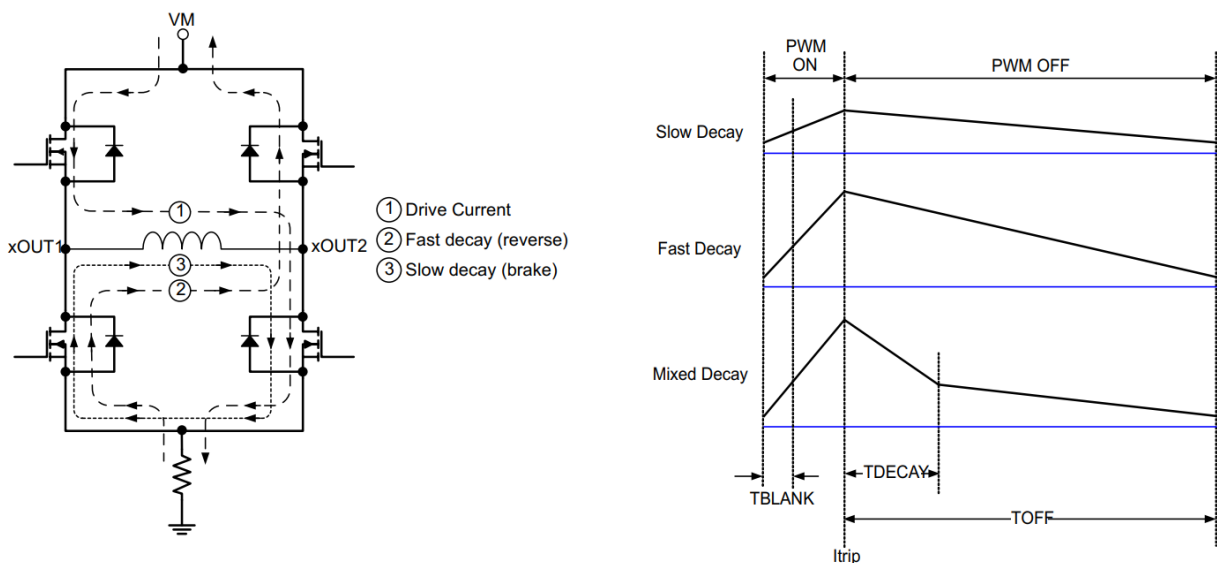


Figura 4.3. Modos de decaimiento [23].

Según el fabricante, en la mayoría de aplicaciones es recomendado usar el decaimiento mixto automático. Este modo de decaimiento elimina algunas de las desventajas de los otros modos de decaimiento cuando el motor está parado y por ende este fue el modo seleccionado para realizar las pruebas de funcionamiento.

### 4.3. Control de motores paso a paso

Para hacer girar un motor paso a paso bipolar, se aplican impulsos en secuencia en los pines de las bobinas, la secuencia de estos impulsos, se aplican con el controlador mediante la placa Teensy.

El pin de STEP es usado para enviar las ordenes al motor. Cada vez que se envía un pulso, el motor girará un paso cuando se encuentre a full step, para esta aplicación son  $1.8^\circ$ .

El pin DIR permite cambiar la dirección de giro del motor. Si está a nivel alto el motor gira en un sentido y si está a nivel bajo el motor gira en el sentido contrario.

#### 4.3.1. MICROSTEPPING

El micropaso o microstep es un método de control de los motores paso a paso que suele utilizarse para conseguir una mayor resolución o un movimiento más suave a bajas velocidades.

Los motores paso a paso se mueven en pasos discretos, o fracciones de una revolución. Para el caso de los motores escogidos en este proyecto, el ángulo de paso es de 1,8 grados y realizará 200 pasos por cada revolución completa del motor ( $360 \div 1,8$ ). Este movimiento discreto significa que la rotación del motor no es perfectamente suave, y cuanto más lenta sea la rotación, menos suave será debido al tamaño relativamente grande del paso. Una forma de paliar esta falta de suavidad a bajas velocidades es reducir el tamaño de los pasos del motor. Aquí es donde entra en juego el microstepping.

El control con microsteps divide cada paso completo en pasos más pequeños para ayudar a suavizar la rotación del motor, especialmente a bajas velocidades. Por ejemplo, un paso de 1.8 grados, puede gracias al controlador seleccionado dividirse hasta 256 veces, proporcionando un ángulo de paso de 0,007 grados ( $1,8 \div 256$ ), o 51.200 micropasos por revolución.

El micropaso se consigue utilizando una tensión modulada por impulsos (PWM) para controlar la corriente que llega a los bobinados del motor. El controlador envía dos ondas sinusoidales de tensión, desfasados en 90 grados, a los bobinados del motor, mientras la corriente aumenta en un bobinado, disminuye en el otro. Esta transferencia gradual de corriente da como resultado un movimiento más suave y una producción de par más consistente que el control de paso completo o de medio paso.

La Figura 4.4 muestra ejemplos de la corriente del motor en uno de los bobinados.

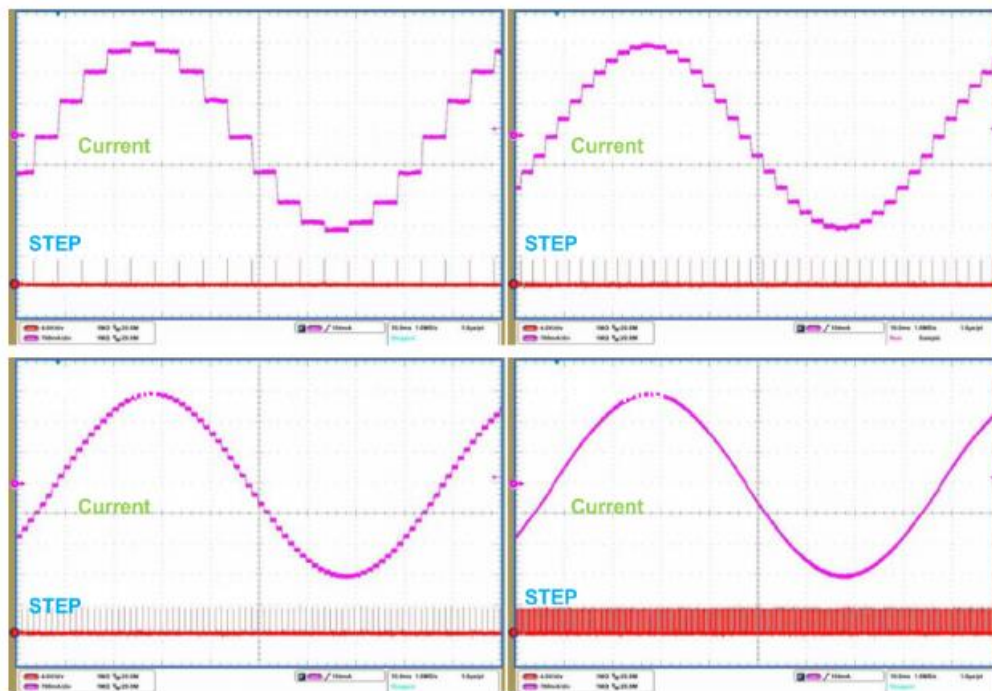


Figura 4.4. Corriente con control de microsteps [23].

Aunque la suavidad de la entrega de par, el movimiento a baja velocidad y la resonancia mejoran con el microstepping, las limitaciones en el control y en el diseño del motor impiden alcanzar sus características ideales. Esto se debe principalmente a que los accionamientos con microsteps sólo pueden aproximarse a una onda sinusoidal real, por lo que sigue habiendo cierta ondulación de par, resonancia y ruido, aunque cada uno de ellos se reduce en gran medida en comparación con los modos de dirección completa y media. Además, la producción de par de un motor paso a paso con control con microsteps es sólo un 70% del par producido con control de paso completo [25].

Es importante evitar lo que a veces se denomina "resolución vacía", en la que el nivel de división de los pasos (es decir, la resolución) es superior al práctico para las limitaciones del sistema. Esto suele ocurrir cuando el par producido por el micropaso es insuficiente para superar el par de fricción del componente que se acciona. El par incremental por micropaso se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T_{inc} = T_{hfs} * \text{sen}\left(\frac{90}{SDR}\right) \quad (4.1)$$

Donde:

$T_{inc}$  = Torque incremental producido por cada microstep

$T_{hfs}$  = Torque de retención del motor

$SDR$  = Relación de división de pasos (número de micropasos por paso completo)

Para los motores seleccionados, se probaron tres configuraciones de microsteps:

Ubicación del motor	Microstepping			Torque incremental producido por cada microstep (Nm)		
	2	4	8			
Eje X	2	4	8	0,42	0,22	0,11
Eje Y	2	4	8	1,41	0,76	0,39
Eje Z	2	4	8	2,82	1,53	0,78

Tabla 4.1. Torque incremental por microsteps en cada motor.

Al momento de ejecutar las pruebas con los motores en vacío se determinó que, con un microstepping de 4, se realizan movimientos suficientemente suaves para ejecutar los movimientos con precisión, sin embargo, estos valores están presentes a cambios una vez se hagan pruebas con todo el modulo ensamblado.

Teniendo en cuenta los torques necesarios para asegurar los movimientos en los diferentes ejes, se tiene que:

Eje del motor	Torque necesario (Nm)	Torque incremental producido por cada microstep (Nm)			Microsteps necesarios para generar el par requerido		
		2	4	8			
X	0,27	2	4	8	1	2	3
Y	13,86	2	4	8	1	2	4
Z	23,13	2	4	8	2	3	5

Tabla 4.2. Microsteps necesarios para cada eje.

Además, operar con más pasos por revolución requiere una mayor frecuencia para el tren de pulsos que acciona los motores. El uso de 8 SDR en la Tabla 4.1 significa que el motor realiza 1.600 pasos, o pulsos, por revolución (200 pasos completos por revolución x 8 micropasos por paso). A una velocidad del motor de 16 rps ( $\approx 1000$  rpm), la frecuencia de pulsos necesaria es de más de 25 KHz.

#### 4.4. Teensyduino

El entorno de programación utilizado es Arduino junto con Teensyduino que es un complemento de software para Arduino, que sirve para ejecutar programas en las placas de desarrollo Teensy.

La mayoría de los programas escritos para Arduino funcionan en Teensy y las funciones estándar de Arduino (`digitalWrite`, `pinMode`, `analogRead`, etc.) marchan en Teensy. Teensyduino también es compatible con muchas bibliotecas y tiene los mismos periféricos integrados que Arduino: entradas analógicas, SPI, I2C, PWM y un puerto serie real. El modo de uso es muy fácil, ya que la carga se realiza por el puerto USB, que no se comparte con el puerto serie, para ser realizada se utiliza Teensy Loader.



Figura 4.5. Teensy loader.

#### 4.4.1. LIBRERÍA ACCELSTEPPER

Esta es una biblioteca de Arduino que Proporciona una interfaz orientada a objetos para motores paso a paso de 2, 3 o 4 pines y controladores de motor.

AccelStepper mejora significativamente la biblioteca estándar de Arduino Stepper en varios aspectos:

- Soporta aceleración y desaceleración
- Soporta múltiples motores simultáneos, con pasos concurrentes independientes en cada motor
- La mayoría de las funciones de la API no generan retrasos o bloquean (a menos que se indique lo contrario)
- Soporta motores de 2, 3 y 4 hilos
- Soporta velocidades muy lentas
- Soporte de subclases

Esta fue una de las librerías con las que se hicieron pruebas para controlar los motores del módulo, esta resulta especialmente útil porque sus funciones son no bloqueantes, es decir, no obstaculizan las demás funciones del controlador mientras se están ejecutando, sin embargo para que los motores se muevan es necesario usar la función `run()`, que debe ser llamada tan frecuentemente como sea posible, pero al menos una vez por intervalo de tiempo de paso mínimo. Esto podría ser un problema ya que el constante llamado a esta función influye en los tiempos de operación de la comunicación por EtherCAT, sin embargo, esto fue solucionado gracias a la función `yield` incluida dentro de Teensyduino.

La operación con esta librería es apta para ser usada en las placas Teensy 4.1 y 3.6

#### 4.4.2. FUNCIÓN YIELD

En el momento de usar la biblioteca AccelStepper simplemente se llamaba a la función `run()` dentro de un bucle, lo que funcionaba bien para código simple donde solo se controlaban los motores, pero tan pronto como haya un código de ejecución más prolongado que incluyese la comunicación



por EtherCAT, la velocidad de llamada de estas funciones se volvía inaceptablemente baja y las bibliotecas no funcionan como se esperaba.

Teensyduino proporciona la función `yield()` que se llama antes de cada llamada a `loop()`, esta funciona como si se ejecutara un segundo hilo en paralelo y no produce ningún retraso considerable, por lo que resultó ideal para el funcionamiento.

#### **4.4.3. TEENSYSTEP**

TeensyStep es una biblioteca de motores paso a paso Arduino altamente eficiente compatible con las placas PJRC Teensy 3.0, 3.1, 3.2, 3.5 y 3.6. La biblioteca puede manejar movimientos sincronizados e independientes de hasta 4 grupos de hasta 10 motores a sus posiciones objetivo. Además del modo de destino, TeensyStep proporciona un modo de rotación continua. En este modo, los motores paso a paso se pueden rotar utilizando velocidades de rotación fijas. La velocidad de rotación se puede cambiar sobre la marcha manteniendo los motores sincronizados. En ambos modos, son posibles frecuencias de pulso de hasta 300.000 pasos por segundo.

Sin embargo, debido a la inercia del motor, no se pueden arrancar a máxima velocidad, pero necesitan una aceleración o desaceleración suave hasta la velocidad final. De lo contrario, los motores pueden perder pasos y los contadores de pasos mantenidos por la aplicación pueden no estar sincronizados con las posiciones reales del motor (errores de pérdida de pasos).

Si bien los micropasos son excelentes para aumentar la resolución y reducir la vibración a baja velocidad, requiere altas frecuencias de pulso incluso a velocidades moderadas del motor, esto no debería ser un problema debido a los 180Mhz de frecuencia del microprocesador que ofrece la Teensy 3.6 sobre la cual, es probada esta librería.

Se evaluó esta opción como una posibilidad más eficiente respecto a la librería AccelStepper, ya que esta ha sido desarrollada especialmente para la Teensy, haciendo uso de los registros y temporizadores específicos de esta. Infortunadamente esta librería no se encuentra disponible para la Teensy 4.1, motivo por el cual se usa la versión 3.6.

#### **4.5. EtherCAT**

EtherCAT es una tecnología de Ethernet industrial en tiempo real desarrollada originalmente por Beckhoff Automation. El protocolo EtherCAT que se da a conocer en el estándar IEC61158 es adecuado para requisitos en tiempo real duros y blandos en la tecnología de automatización, en pruebas y mediciones y en muchas otras aplicaciones.

El EtherCAT maestro envía un telegrama que pasa por cada nodo. Cada dispositivo EtherCAT esclavo lee “sobre la marcha” los datos direccionados a él e inserta sus datos en la trama mientras la trama continua en movimiento. El retardo de la trama se debe únicamente a los tiempos de retardo de propagación del hardware. El último nodo de un segmento (o línea de derivación) detecta un puerto abierto y envía el mensaje al maestro utilizando la función full duplex de la tecnología Ethernet.

El maestro EtherCAT es el único nodo dentro de un segmento al que se le permite enviar activamente una trama EtherCAT; todos los demás nodos simplemente reenvían tramas aguas abajo. Este concepto evita retrasos impredecibles y garantiza capacidades en tiempo real.

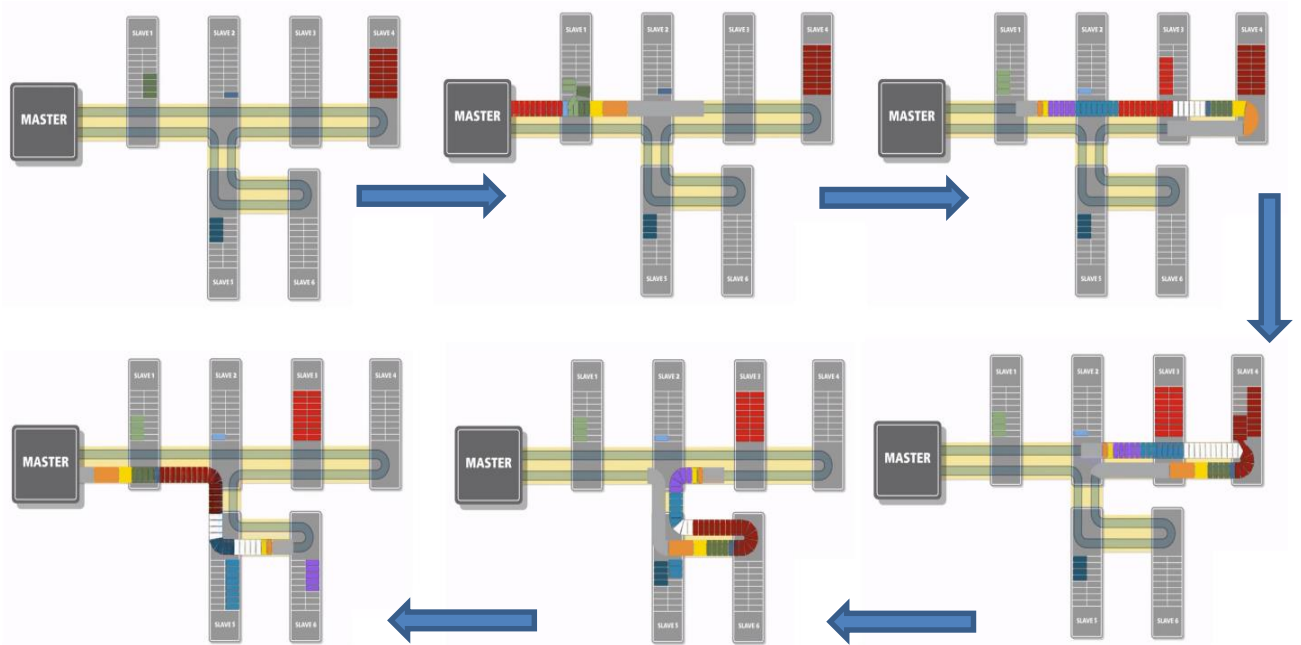


Figura 4.6. Principio funcional Ethercat.

#### 4.5.1. EASYCAT

EasyCAT es una línea de placas que permite desarrollar esclavos dentro del protocolo EtherCAT de forma sencilla. Estas eran usadas inicialmente en el primer diseño del módulo, pero en la nueva versión de la PCB, el circuito integrado encargado de la comunicación estará incluido dentro de esta.

El fabricante de las placas EasyCAT, también realizó una librería para el uso de estas. Esta librería ha sido aprovechada y configurada para ser usada dentro de este proyecto.

#### 4.6. Pruebas

En la siguiente tabla se enumeran las pruebas realizadas y los resultados obtenidos

Placa controladora	Librería	Prueba realizada	Resultado	Comentarios
Teensy 4.1	AccelStepper	Funcionamiento de los motores con cambio de velocidades y cambios de giro en marcha , mientras	OK	Durante la ejecución del programa se notaron vibraciones no deseadas en los motores cuando se ejecutaba la comunicación por EtherCAT, sin embargo, no hubo retrasos ni información alterada durante el tiempo de operación de los motores. El cambio de giro y de velocidad en marcha, no ha afectado el estado de la comunicación.

Teensy 3.6		se reciben datos por EtherCAT y son visualizados por el puerto serial.	OK	Al igual que los resultados obtenidos con la Teensy 4.1, hubo presencia de vibraciones indeseadas, pero no se han notado diferencias en las frecuencias de operación.
Teensy 3.6	Teensystem		OK	Los motores y la comunicación han marchado sin evidenciar alguna interferencia. A diferencia de la librería AccelStepper, se han visto problemas para realizar cambios de giro y velocidad sobre la marcha

Tabla 4.3. Pruebas realizadas.

Hay diferencias notables en cuanto al uso de las dos librerías, esto se debe a que, en efecto la librería Teensystem ha sido específicamente diseñada para la Teensy 3.6, sus creadores no han logrado optimizarla para la versión 4.1.

En cuanto a las vibraciones detectadas en los motores al usar la librería AccelStepper, se ha buscado en el programa que parte de la rutina es la que está generando esta reacción.

Se ha determinado que hay un tiempo de ciclo dentro de la función MainTask en la librería EasyCAT en el cual se encuentran 116us en donde la función run() de la librería AccelStepper no se es llamada. Esto se debe a los tiempos propios de operación de dicha función.

La solución hallada para esto, se basó en determinar precisamente el tiempo de duración de cada instrucción dentro de esta función para incluir llamadas de la función run() dentro de la función MainTask(), con esto se desea disminuir el tiempo durante el cual no se llama la función run() y así disminuir las vibraciones presentes en los motores.

Después de varios intentos, se concluyó incluir cuatro de estos llamados en la función MainTask(), limitando así a un tiempo máximo de 31us en donde la función run() no fuese llamada. Con esto, las vibraciones fueron disminuidas hasta un punto en el cual son imperceptibles. La programación con microsteps también ayudó al proporcionar movimientos más suaves.

Los códigos realizados para las pruebas pueden ser visos en la sección de Anexos - CODIGO TEENSY



## 5. PROPUESTA ADICIONAL

Al haber culminado el diseño del módulo de inspección, se hizo una propuesta para proporcionar al módulo de un cuarto grado de libertad. Esta consiste en un Sistema de piñón de rodillo y cremallera para desplazar todo el modulo horizontalmente sobre el arco donde estará posicionado. Esta alternativa fue presentada para aquellos casos en los que los módulos deban ser reubicados rápidamente dentro de diferentes procesos, donde las piezas a inspeccionar posean geometrías que así lo requieran.

Como fue mencionado en el apartado de Diseño electrónico, en esta propuesta es donde se utilizará un cuarto motor para ejecutar el movimiento sobre el arco metálico.

### 5.1. Concepto mecánico

La propuesta que se expondrá a continuación, se encuentra únicamente en la fase de concepto, motivo por el cual no serán expuestos presupuestos ni las soluciones en detalle.

#### 5.1.1. SOPORTE MÓVIL DEL MÓDULO

Esta pieza contiene todos los agujeros requeridos para sostener el sistema en su totalidad, con la diferencia de que los orificios presentes para soportar el modulo al arco fueron reemplazados por otros en donde se sujetaran a guías lineales. En este caso el material a usar pasó de ser chapa de aluminio a un perfil metálico en hierro.

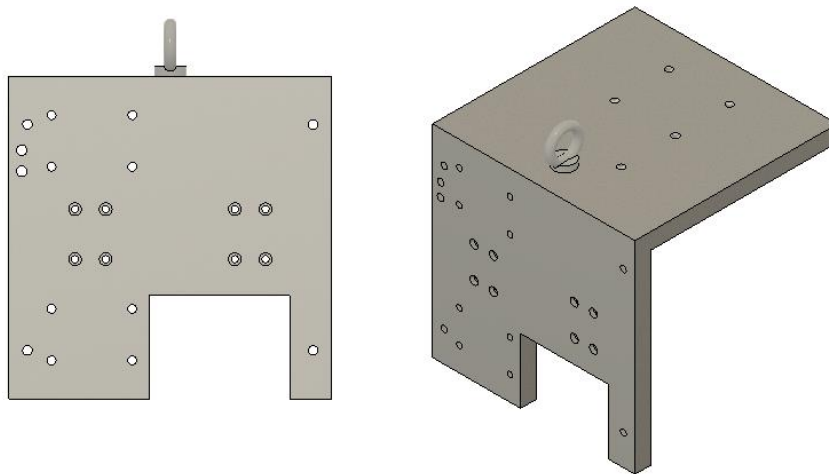


Figura 5.1. Soporte módulo móvil.

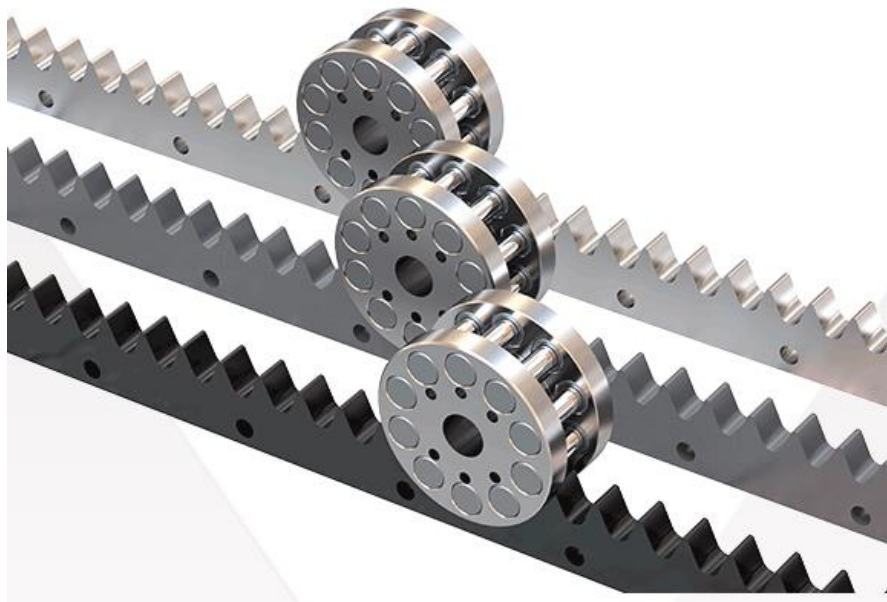
El perfil metálico fue escogido debido a que se requiere rigidez en la pieza que soportará todo el modulo, ya que es también donde se soportará para realizar la traslación horizontalmente. En este caso se decidió incluir un cáncamo para facilitar su instalación.

#### 5.1.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN NEXEN

Una solución para desplazar el modulo consiste en un sistema de piñón cremallera convencional. Al momento de ejecutar el movimiento de traslación de todo el modulo, se requiere que una vez alcanzada su posición objetivo este permanezca completamente estático, por lo cual la solución con el sistema piñón cremallera podría no ser suficiente para garantizar que no se presenten vibraciones indeseadas, y es que para estos sistemas existe un porcentaje de retroceso que por mínimo que pueda considerarse, significa una perturbación al momento de realizar una inspección. Es por esto que buscando por alternativas a este sistema se encontró un sistema de piñón de rodillo

y cremallera del fabricante NEXEN, donde básicamente se reemplaza el piñón dentado (engranaje) por un piñón de tipo jaula que incorpora rodillos soportados por rodamientos.

Cada rodillo del piñón está soportado por dos cojinetes de agujas, lo que elimina la fricción de deslizamiento que se produce en los sistemas tradicionales de piñón y cremallera. Esto reduce en gran medida el calor y el desgaste del piñón, lo que da como resultado una eficiencia de hasta el 99 por ciento.



*Figura 5.2. Sistema piñón de rodillo y cremallera.*

El perfil de los dientes de la cremallera también es único. Se crea colocando puntos en un espacio uniforme alrededor de un círculo y, a medida que el círculo rueda sobre una superficie plana, sigue esos puntos hasta que llegan a la superficie. Los caminos creados por estos puntos son curvas cicloidales que forman un perfil similar a un diente. A continuación, se colocan rodillos, que sirven como dientes de piñón, en cada punto del círculo. A medida que el círculo vuelve a rodar a lo largo de una superficie plana, los rodillos modifican las curvas para crear los dientes del engranaje reales. El resultado es un perfil de diente que permite que los rodillos del piñón se acerquen a los dientes en una tangente, de modo que rueden hacia abajo por la cara del diente con suavidad. Esto no solo reduce significativamente el ruido, sino que también según el fabricante elimina el juego, lo cual resulta ideal para esta aplicación.

Dentro de los productos ofertados, se encuentra que se puede pedir el piñón con brida ISO 9409, siendo esta perfecta para ser ajustada al eje de salida de la reductora que se utilizará para este eje.

### **5.1.3. SOPORTE PARA EL MOTOR DEL CUARTO EJE**

Esta pieza tiene la finalidad de unir el motor seleccionado al soporte del módulo. Está diseñada para ser lo más compacta posible y resistir las sollicitaciones mecánicas sin presentar deformación alguna. El material de fabricación es aluminio de 10mm de grosor.

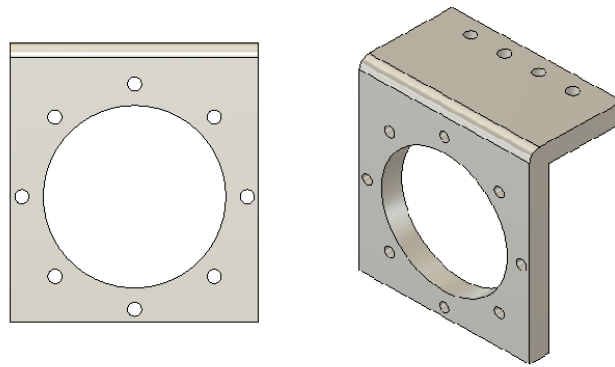


Figura 5.3. Soporte motor cuarto eje.

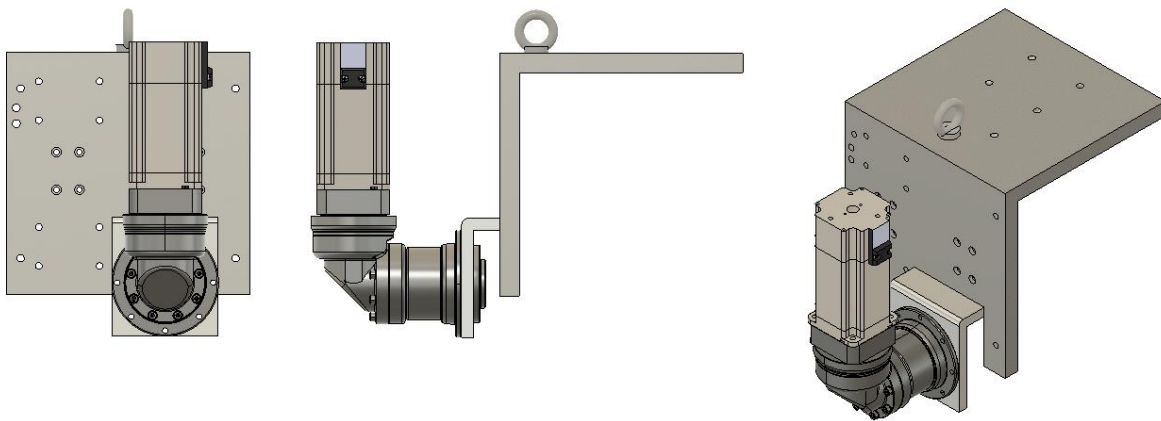


Figura 5.4. Soporte móvil del módulo ensamblado con el actuador.

#### 5.1.4. GUÍAS LINEALES

Para facilitar el movimiento a través del arco metálico, se escogen unas guías lineales del fabricante HIWIN, cuya serie WE tiene la misma capacidad de carga en dirección radial, radial inversa y lateral con puntos de contacto a 45 grados. Esto, junto con la anchura del raíl, permite que la guía esté preparada para soportar grandes cargas, momentos y rigidez. Por su diseño, tiene una capacidad de autoalineación que puede absorber la mayoría de los errores de instalación y puede cumplir con los estándares de alta precisión. La capacidad de utilizar un solo raíl y de tener un perfil bajo con un centro de gravedad bajo es ideal cuando el espacio es limitado y/o los momentos son elevados.

Para esta aplicación se seleccionaron dos tamaños de ensamblajes diferentes, siendo el mayor de 35mm de altura para el área que soportará la carga radial en la cara superior, mientras que el ensamblaje situado en la cara frontal será de 21mm.

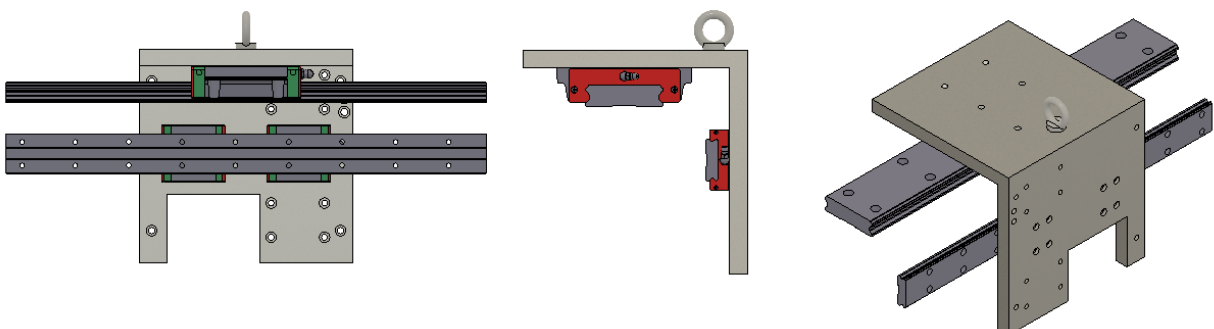


Figura 5.5. Ensamble con guías lineales.

### 5.1.5. SELECCIÓN DEL MOTOR

El peso total aproximado de todo el módulo junto con el soporte y las piezas mecanizadas para sostenerlo en conjunto es de 35,74 Kg. El centro de gravedad de este conjunto fue calculado en el software de diseño y se estimó que se encuentra a una distancia de 0,0541m del eje del motor, con lo cual se procede a calcular con la fórmula 2.1 el torque necesario que debe producir el motor para ejercer la traslación.

$$T = 18 \text{ N/m}$$

A este valor hallado se le añade un factor de seguridad de 1,5. Por lo tanto, el valor del torque necesario para este motor, será de

$$T = 27 \text{ N/m}$$

Una vez es conocido el torque requerido para asegurar el movimiento, se buscan combinaciones de motor/reductora con las medidas más reducidas posibles, que provean un torque suficiente para la traslación horizontal. El motor seleccionado es el mismo que para el eje Z y sus especificaciones pueden ser vistas en la Tabla 2.11. Datos técnicos del motor eje Z.

### 5.1.6. SELECCIÓN DE REDUCTORA

En este caso, se decide usar una reductora a 90° para tener un diseño más compacto. La reductora escogida fue una PDR060 del fabricante Apex dynamics, esta cuenta con un eje de salida ISO 9409 y se presenta perfecto para ser ensamblado directamente con el piñón. cuenta con las siguientes características:

Relación		1:10
Etapas		1
Par nominal de salida	Nm	27
Par máximo de salida	Nm	3 veces el par nominal de salida
Juego angular	arcmin	≤ 11
Carga radial máxima	N	880
Carga axial máxima	N	440
Rendimiento	%	≥ 93

Tabla 5.1. Datos técnicos de la reductora del cuarto eje [3].

Conociendo las características de la reductora elegida, el torque final proporcionado en este eje será de 27N. Valor suficiente para realizar el movimiento horizontal sobre el arco metálico.



### 5.1.7. ENSAMBLE DEL MÓDULO CON SOPORTE MÓVIL

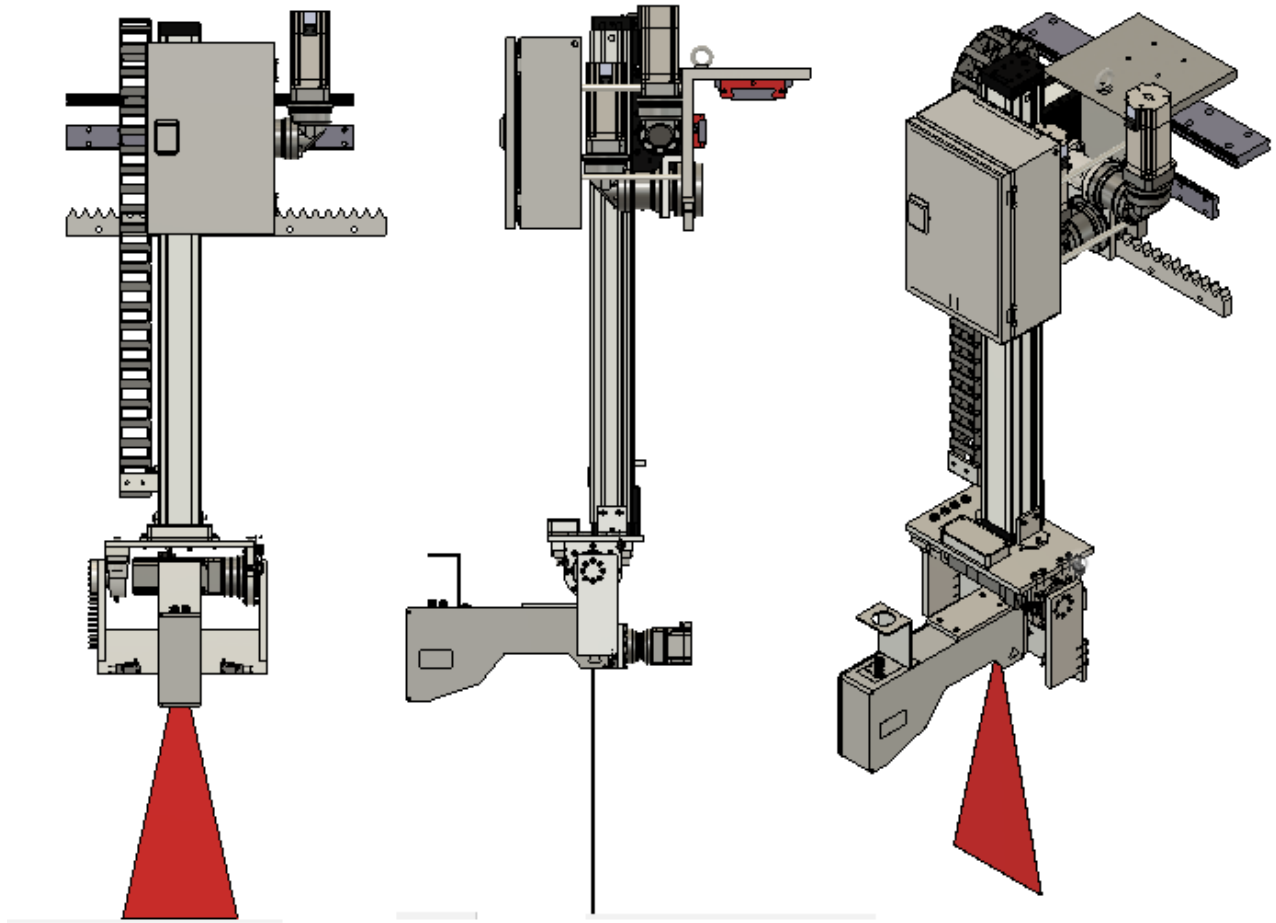


Figura 5.6. Módulo con soporte móvil.

Los planos detallados de las piezas adicionales de esta propuesta pueden ser vistos en la sección de Anexos - PLANOS MECÁNICOS



## 6. **RESULTADOS**

Como resultados obtenidos se pueden enunciar los siguientes:

- ✓ El juego mecánico presente en los ejes X y Y ha sido disminuido, al pasar de un juego mayor de 60arcmin por uno menor a 8arcmin para el eje X y de 7arcmin para el eje Y, con lo que se esperan obtener mediciones más precisas.
- ✓ El margen de movimiento del sensor ha sido aumentado de 30° a 140° para el eje X, mientras que para el eje Y, paso de 40° a 140°.
- ✓ Pese a que el sistema no ha sido ensamblado en su totalidad, se ha dispuesto de un nuevo punto de afianzamiento del módulo lineal, que en el diseño muestra una mayor área de soporte con lo cual se disminuyen las vibraciones mecánicas que repercuten al momento de analizar piezas.
- ✓ El diseño electromecánico del módulo ha sido ejecutado utilizando componentes más robustos, con lo que se espera que la velocidad de operación sea incrementada.
- ✓ Se han elegido elementos más acordes para facilitar el montaje electrónico.
- ✓ Se espera prolongar la vida útil de los cables que pasan por la cadena portacables, ya que ha sido cambiada por una con medidas más amplias con el fin de evitar ángulos de giro muy cerrados.
- ✓ Los agujeros que existían en las chapas metálicas para pasar cables han sido suprimidos y en su lugar se ha dispuesto de canaleta para mejorar su posicionamiento.
- ✓ Ha sido diseñada una nueva placa controladora para los motores que no hace uso de comandos SPI para manejarlos, esto contribuirá a disminuir funcionamientos erróneos por culpa del ruido eléctrico.
- ✓ Se han evaluado dos alternativas para la programación del módulo, estas pueden ser usadas en dos referencias diferentes de Teensy.
- ✓ El peso total del módulo fue reducido en un 15%.
- ✓ Se ha diseñado un modelo con menor cantidad de piezas, lo que facilita el ensamble del módulo y también disminuye el costo de fabricación al tener menos piezas de fabricación externa.
- ✓ Se ha presentado una idea concepto para proporcionar al módulo de inspección un cuarto grado de libertad

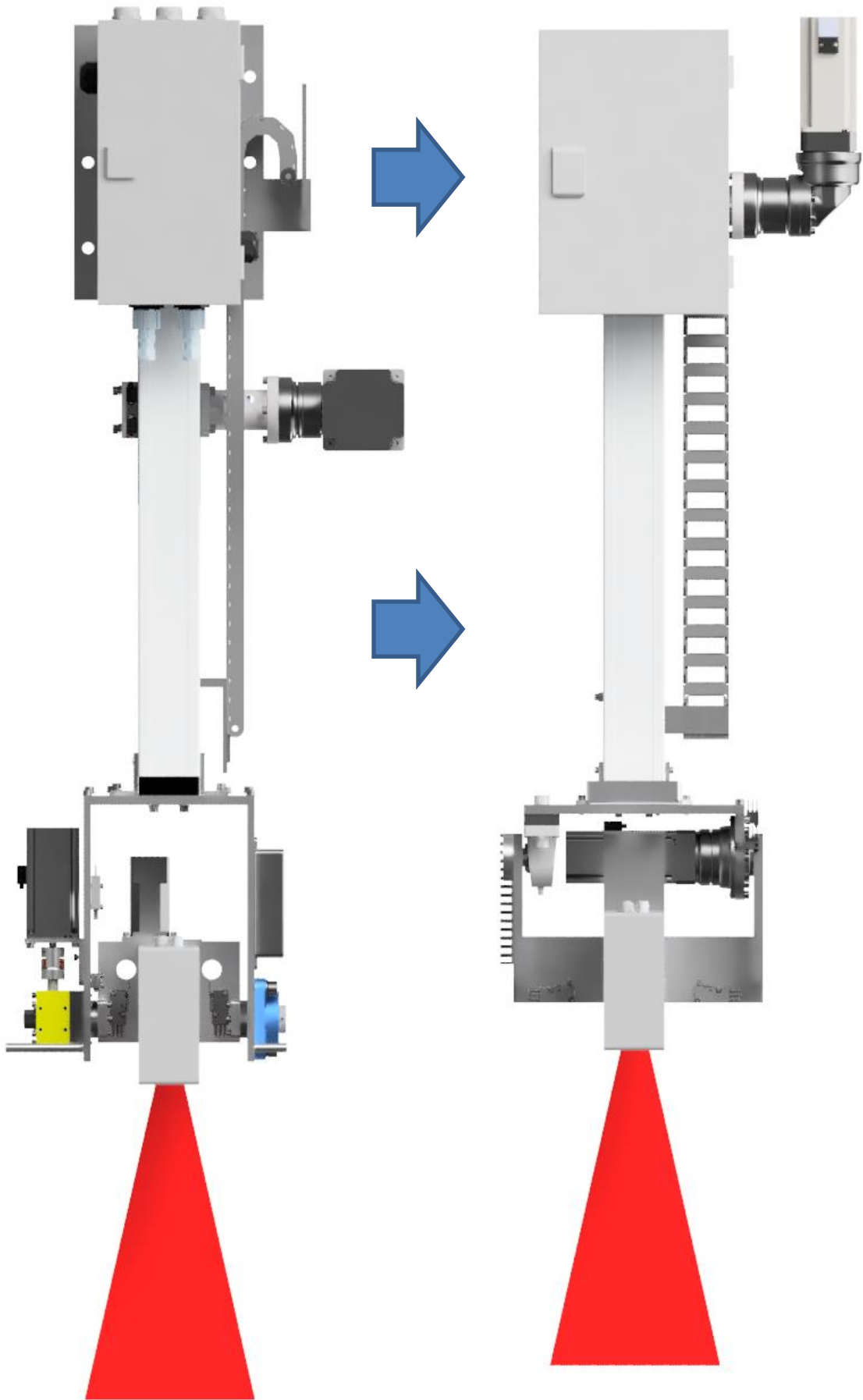


Figura 6.1. Modulo antiguo Vs Modulo nuevo.

## 7. PRESUPUESTO

En este apartado se hace referencia a los costos derivados de la elaboración del proyecto.

### 7.1. Presupuesto de Ingeniería

TAREA	HORAS	€/HORAS	COSTO FINAL(€)
Análisis previo	140	25	3.500
Diseño mecánico	180	25	4.500
Diseño electrónico	150	25	3.750
Programación	120	25	3.000
Montaje	10	25	250
Verificación	20	25	500
<b>TOTAL (€)</b>			<b>15.500</b>

La duración total del proyecto ha sido de 620 horas, lo que es igual a un total aproximado de 78 días laborales de 8 horas diarias y un total de 15,5 semanas laborales.

### 7.2. Presupuesto del proyecto

#### 7.2.1. GASTOS EN COMPONENTES COMERCIALES

Artículo	Fabricante	N.º Referencia	Proveedor	Descripción	Precio Unidad (€)	Cantidad Total	Precio Total (€)
Modulo Lineal	Unimotion	Mtjz-65-450-10-0-1	Tecnopower	Modulo Lineal (Eje Z)	800	1	800
Reductor Planetario	Apex	Peiir070 Rel.7 J<11'ø8	Tecnopower	Reductor Eje Z	342,65	1	342,65
Reductor Planetario	Apex	Pd064010 Pd064 Rel. 10 J<7	Tecnopower	Reductor Eje Y	232,1	1	232,1
Reductor Planetario	Apex	Pd053010 Pd053 Rel. 10 J<8	Tecnopower	Reductor Eje X	226,6	1	226,6
Campana	Unimotion	Mtj-65	Tecnopower	Acople Motor Eje Z Y Reductora	146	1	146
Motor	Stepperonline	23bk20-20	Stepperonline	Motor Con Freno Eje Y	78,72	1	78,72
Motor	Stepperonline	24hs39-4204d-B200	Stepperonline	Motor Con Freno Eje Z	69,99	1	69,99
Motor	Nanotec	Sca5618x2804-A	Nanotec	Motor Eje X	37,3	1	37,3
Caja eléctrica	Rittal	Kx 1554.000	Automation 24		37,2	1	37,2
Acoplamiento	Face	Gesm14	Tecnopower	Diametro1=16, Diametro2=16, Par Nominal=12,5nm	33,26	1	33,26
Portacables	Igus	B17i.3.048.0 Carrera 820	Igus	Portacables	25,87	1	25,87
Rodamiento de soporte de eje	Rs Pro	750-8946	Rs	Rodamiento Eje Y	12,36	1	12,36
Caja	Hammond	773-3088	Rs	Caja Borneras	8,76	1	8,76
Microswitch	Panasonic	699-0316	Rs	Microswitch Eje Z	7,96	2	15,92

Microswitch	Panasonic	699-0397	Rs	Microswitch Eje X	9,65	2	19,3
Microswitch	Panasonic	699-0094	Rs	Microswitch Eje Y	7,66	2	15,32
Canaleta	Rs Pro	756-8837	Rs	Canaleta Ranurada Para Cables De Motor Eje X Y Microswitches	5,28	1	5,28
Mosfet n	Diode incorporated	Dmth6016lsd-13	Jlpcb	Dual n-channel enhancement mode mosfet	0,57	4	2,28
Mosfet p	Diode incorporated	Dmp6023le-13	Jlpcb	P-channel enhancement mode mosfet	0,38	1	0,38
Diodo zener	Mdd(microdiode electronics)	Bzt52c12	Jlpcb	Surface mount zener diode	0,0172	1	0,0172
Resistencia	Uniroyal elec	25121wj033lt4e	Jlpcb	Lead-free thick film chip resistors	0,0328	2	0,0656
Resistencia	Tyohm	Rmc0603100k1% n	Jlpcb	Lead-free thick film chip resistors	0,002	1	0,002
Resistencia	Uniroyal elec	0603waf1002t5e	Jlpcb	Lead-free thick film chip resistors	0,0024	3	0,0072
Resistencia	Uniroyal(uniroyal elec)	0603waf475jt5e	Jlpcb	Lead-free thick film chip resistors	0,0027	4	0,0108
Condesador	Lelon	Vzh470m2atr-1010	Jlpcb	Capacitor supply reverse protection	0,1791	2	0,3582
Condesador	Fh(guangdong fenghua advanced tech)	1206b475k500nt	Jlpcb	Multilayer ceramic capacitors mlcc - smd	0,0764	1	0,0764
Condesador	Samsung electro-mechanics	CI21b104kcfnnne	Jlpcb	Multilayer ceramic capacitors mlcc - smd	0,0138	4	0,0552
Condesador	Samsung electro-mechanics	CI31b105kchnnne	Jlpcb	Multilayer ceramic capacitors mlcc - smd	0,0546	2	0,1092
Condesador	Samsung electro-mechanics	CI10b102kc8nnnc	Jlpcb	Multilayer ceramic capacitors mlcc - smd	0,0066	1	0,0066
Pines	Boomele(boom precision elec)	C247920	Jlpcb	Pines conexión driver x 12	0,0563	1	0,0563
Pines	Mintron	Mtp125-1104s1	Jlpcb	Pines conexión driver x 4	0,79	1	0,79
Conector	Phoenix contact	1727010	Jlpcb	Conectores entrada de motores y alimentación eléctrica	0,541	3	1,623
<b>TOTAL (€)</b>							<b>2.238,23</b>

### **7.2.2. GASTOS DE FABRICACIÓN MECÁNICA**

En este apartado se diferencian algunas piezas en donde se requiere mayor precisión de fabricación, por lo cual se distingue el presupuesto de piezas hechas por una empresa externa con maquinaria CNC, así como el costo de las piezas elaboradas localmente en la empresa Dsiplus.

<b>FABRICACIÓN</b>	<b>CANTIDAD DE PIEZAS</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>COSTO (€)</b>
Externa	9	Aluminio	500
Local	8	Aluminio	200
<b>TOTAL (€)</b>			<b>700</b>

**7.2.3. GASTOS DE FABRICACIÓN ELECTRÓNICA**

El costo total de fabricación a continuación mostrado, es el costo para 5 PCBs, ya que es la cantidad mínima de unidades que la empresa fabricante realiza.

<b>FABRICACIÓN</b>	<b>COSTO (€)</b>
Tarifa de instalación	7
Plantilla	1,5
Tarifa de componentes extendida.(cuando se requiere un cambio de alimentadores por el tipo de componente)	21
Montaje SMT	0,63
<b>TOTAL(€)</b>	30,13
<b>COSTO POR UNIDAD(€)</b>	6,026

**7.3. Costo total del proyecto**

A continuación, se suman los costos expuestos anteriormente. El resultado es el importe final del proyecto al que se le ha de aplicar el correspondiente IVA

Presupuesto de Ingeniería(€)	15.500
Presupuesto del proyecto(€)	2.968,36
<b>COSTO TOTAL (€)</b>	18.468,36

El presupuesto del proyecto asciende a la cantidad final de dieciocho mil cuatrocientos sesenta y ocho euros con treinta y seis euros.





## 8. CONCLUSIONES

Una vez se ha finalizado el nuevo diseño electromecánico del módulo de inspección se han obtenido las siguientes conclusiones:

El uso de reductoras con bridas ISO9409 para los ejes XY significó una disminución considerable en los ajustes mecánicos. Fue una solución que simplificó el diseño y mejoró notablemente el juego que se presentaba en estos dos ejes en el diseño preliminar.

En las pruebas realizadas, los motores ensamblados con las reductoras han presentado un rendimiento ideal, sin embargo, para definir y limitar la velocidad a la cual estarán en funcionamiento los ejes, se deben realizar de nuevo pruebas de funcionamiento cuando el sistema se encuentre ensamblado en su totalidad. Con los valores tomados en el desarrollo de este proyecto se evidencia un aumento de 600% para la velocidad en los ejes XY y de 195% para el eje Z.

El protocolo EtherCAT es una tecnología Ethernet industrial muy rápida. Esto representa una enorme ventaja para la aplicación en los módulos de inspección, ya que estos pueden recibir las instrucciones casi que inmediatamente para adaptarse rápidamente a la geometría de la pieza.

El sistema electrónico diseñado cumple con los requerimientos propuestos y permite realizar un control adecuado sobre los motores.

EtherCAT ofrece las características del Ethernet Industrial, pero en este caso a un precio incluso inferior que el de un sistema de bus de campo clásico. El único hardware necesario por el dispositivo maestro es un puerto Ethernet. No se requieren costosas tarjetas de interfaz ni coprocesadores. Los controladores esclavos EtherCAT están disponibles mediante un circuito integrado en la nueva PCB. Puesto que estos controladores económicos llevan la carga de todas las tareas en las que el tiempo es un factor crítico, EtherCAT por sí mismo no exige ningún requisito de rendimiento a la CPU de dispositivos esclavos, lo que mantiene los costes de dispositivo bajos. Puesto que EtherCAT no requiere conmutadores u otros componentes de infraestructura activos, los costes por estos componentes y su instalación, configuración y mantenimiento tampoco existen.

El programa desarrollado incluye únicamente la configuración de los motores, así como el establecimiento de la comunicación por EtherCAT. Para contar con el módulo operativo se debe realizar una inclusión y/o adaptación del programa con el resto del código desarrollado por la empresa.

En caso de presentar fuertes perturbaciones en cuanto al control de pasos que reciben los motores, se contempla como una buena alternativa la implementación de un control con BEMF, usando la salida para esto que viene incluida dentro del controlador DRV8711.



## **BIBLIOGRAFIA**

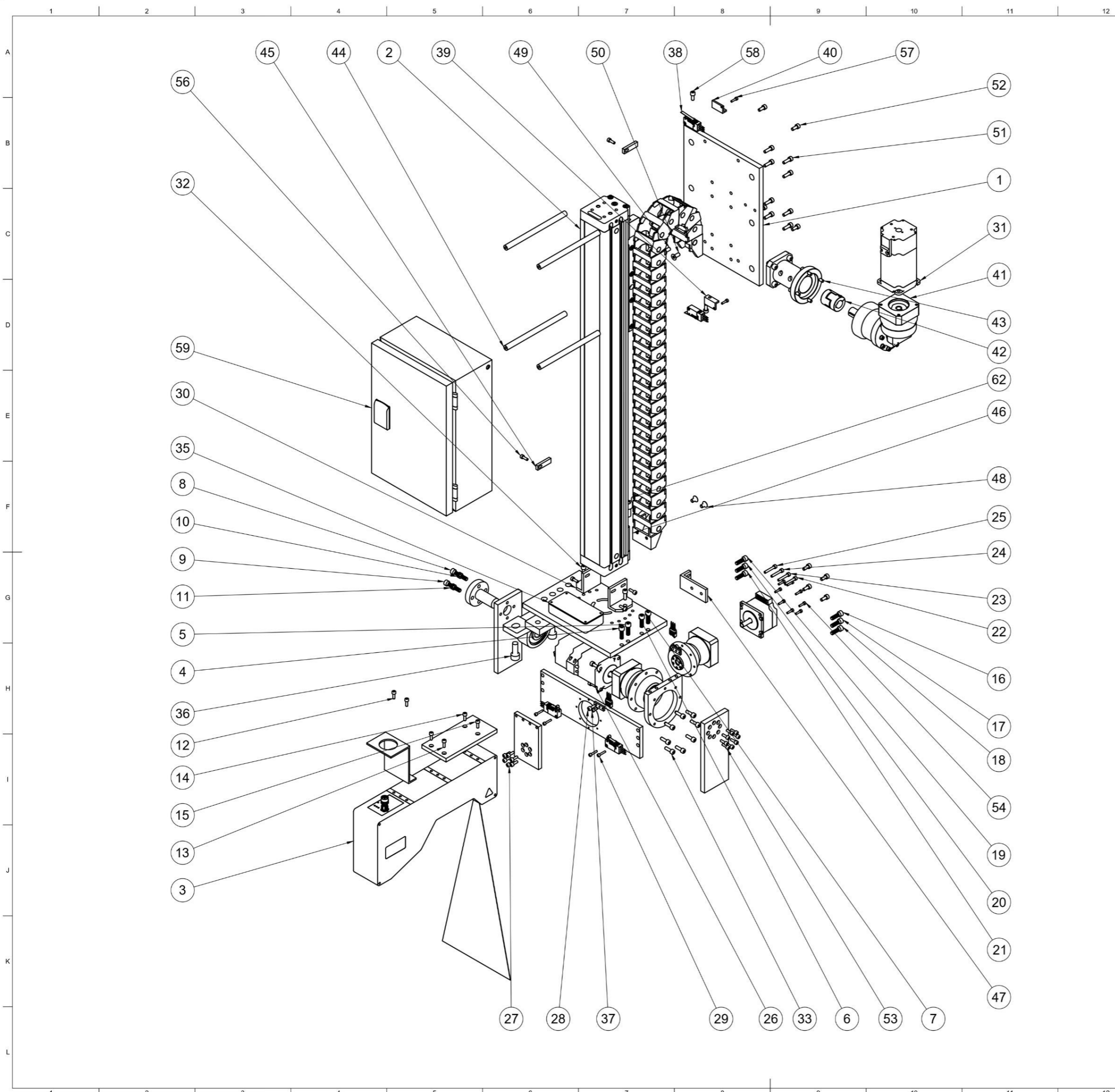
- [1] J. M. Juárez, Reconstrucción de perfiles submicrométricos con holografía conoscópica para la medición de rugosidad, Ph. D. Dissertation, Universidad de Oviedo, 2015.
- [2] «Nanotec plug & drive,» [En línea]. Available: <https://en.nanotec.com/products/2751-sca5618x2804-a>. [Último acceso: 22 03 2021].
- [3] «Apex dynamics,» PD-series high precision Gearbox, [En línea]. Available: [https://www.apexdyna.com/PD\\_pro.aspx](https://www.apexdyna.com/PD_pro.aspx). [Último acceso: 22 03 2021].
- [4] «Industrial Panasonic,» [En línea]. Available: <https://na.industrial.panasonic.com/products/electromechanical/switches/lineup/seal-type-snap-action-switches/series/81324/model/81520>. [Último acceso: 05 04 2021].
- [5] «Stepperonline,» [En línea]. Available: <https://www.omc-stepperonline.com/p-series-nema-23-stepper-motor-2nm-283-28oz-in-with-electromagnetic-brake.html>. [Último acceso: 23 03 2021].
- [6] «Rs Online,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/soportes-de-ejes-con-rodamientos/7508946/>. [Último acceso: 23 03 2021].
- [7] «Industrial Panasonic,» [En línea]. Available: <https://na.industrial.panasonic.com/products/electromechanical/switches/lineup/seal-type-snap-action-switches/series/81324/model/81520>. [Último acceso: 05 04 2021].
- [8] «Hammond Manufacturing,» [En línea]. Available: <https://www.hammmfg.com/part/1590G>. [Último acceso: 07 04 2021].
- [9] «RS Online,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/p/canalizaciones-paracables/7568837/>. [Último acceso: 12 04 2021].
- [10] «Unimotion,» [En línea]. Available: <https://unimotion.eu/en/category/84920/pids/84901,84871>. [Último acceso: 05 04 2021].
- [11] «Lean technik,» [En línea]. Available: <https://leantechnik.com/en/products/lifgo/>. [Último acceso: 05 04 2021].
- [12] «Stepperonline,» [En línea]. Available: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-24-stepper-40nm566-ozin-w-brake-friction-torque-20nm283ozin-24hs39-4204d-b200.html>. [Último acceso: 05 04 2021].
- [13] «Apex dynamics,» [En línea]. Available: [https://www.apexdyna.com/PE2R\\_pro.aspx](https://www.apexdyna.com/PE2R_pro.aspx). [Último acceso: 05 04 2021].
- [14] «Igus,» [En línea]. Available: [https://www.igus.es/iPro/iPro\\_01\\_0003\\_0008\\_ESes.htm?ArtNr=B17i.3.048.0&c=ES&l=e.s](https://www.igus.es/iPro/iPro_01_0003_0008_ESes.htm?ArtNr=B17i.3.048.0&c=ES&l=e.s). [Último acceso: 12 04 2021].
- [15] «Rittal,» [En línea]. Available: [rittal.com/com-en/products/PG0002SCHRANK1/PG0003SCHRANK1/PGRP30363SCHRANK1/PRO70635?variantId=1554000](http://rittal.com/com-en/products/PG0002SCHRANK1/PG0003SCHRANK1/PGRP30363SCHRANK1/PRO70635?variantId=1554000). [Último acceso: 12 04 2021].
- [16] «Rs online,» [En línea]. Available: <https://ie.rs-online.com/web/p/microswitches/6990316/>. [Último acceso: 05 04 2021].
- [17] «PJRC,» [En línea]. Available: <https://www.pjrc.com/teensy/>. [Último acceso: 03 05 2021].
- [18] «Texas instruments,» [En línea]. Available: <https://www.ti.com/product/DRV8711>. [Último acceso: 03 05 2021].
- [19] «Inventable - la electronica simple y clara,» [En línea]. Available: <https://www.inventable.eu/como-conectar-un-mosfet-a-un-microcontrolador/>. [Último acceso: 17 05 2021].

- [20] «Digikey,» [En línea]. Available: <https://www.digikey.es/es/blog/how-to-select-a-mosfet-for-logic-circuits-or-gate-design>. [Último acceso: 13 05 2021].
- [21] «Learning about electronics,» [En línea]. Available: <http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/N-Channel-MOSFETs>. [Último acceso: 13 05 2021].
- [22] «Components 101,» [En línea]. Available: <https://components101.com/articles/design-guide-pmos-mosfet-for-reverse-voltage-polarity-protection>. [Último acceso: 13 05 2021].
- [23] « DRV8711 - Datasheet,» [En línea]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8711.pdf?ts=1625226400586&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8711.pdf?ts=1625226400586&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). [Último acceso: 15 05 2021].
- [24] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://es.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface). [Último acceso: 15 05 2021].
- [25] «Linear motion tips,» [En línea]. Available: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>. [Último acceso: 15 05 2021].

# **ANEXOS**



# **ANEXO 1** **PLANOS MECÁNICOS**



Parts List				Parts List			
Item	Qty	Part Name	Material	Item	Qty	Part Name	Material
48	2	DIN 7991 M6x10 v2	Steel	1	1	Soportemodulo1 v1	Aluminum
49	1	DIN 7991 M6x14 v2	Steel	2	1	MTJZ 65 450 10 0 1(1) v1	Steel
50	1	DIN 7991 M6x14 v2 (1)	Steel	3	1	EjesXY v1	
51	8	M5X16 v1 (1)	Steel	4	1	M6x20 v1	Steel
52	4	M5X12 v1 (2)	Steel	5	1	M6x20 v1 (2)	Steel
53	8	M4X12 v1 (7)	Steel	6	1	M6x20 v1 (1)	Steel
54	8	M3X12 v1	Steel	7	1	M6x20 v1 (3)	Steel
55	2	M5X12 v1	Steel	8	1	M6x15 v1 (6)	Steel
56	6	M4X12 v1 (8)	Steel	9	1	M6x15 v1 (7)	Steel
57	2	M3X12 v1 (1)	Steel	10	1	M6x15 v1 (8)	Steel
58	2	M5X12 v1 (3)	Steel	11	1	M6x15 v1 (9)	Steel
59	1	1554.000 (2) v1	Steel	12	3	M4X12 v1	Steel
60	1	Canaleta v1	Steel	13	1	M4X12 v1 (1)	Steel
61	1	Canaleta2 v1	Steel	14	1	M4X12 v1 (2)	Steel
62	4	M10x20 v1	Steel	15	1	M4X12 v1 (3)	Steel
				16	1	M6x20 v1 (4)	Steel
				17	1	M6x20 v1 (5)	Steel
				18	1	M6x20 v1 (6)	Steel
				19	1	M6x20 v1 (7)	Steel
				20	1	M6x20 v1 (8)	Steel
				21	1	M6x20 v1 (9)	Steel
				22	1	M4X25 v1	Steel
				23	1	M4X25 v1 (1)	Steel
				24	1	M4X25 v1 (2)	Steel
				25	1	M4X25 v1 (3)	Steel
				26	8	M5X12 v1 (1)	Steel
				27	6	M4X12 v1 (4)	Steel
				28	2	M4X12 v1 (5)	Steel
				29	4	M3X16 v1	Steel
				30	2	T_escuadra v1	Aluminum
				31	1	24HS39-4204D_10 0mm v1	Steel
				32	2	M5X16 v1	Steel
				33	8	M5X16 v1 (4)	Steel
				34	4	DIN 933 M5x20 v1	Steel
				35	1	Caja v1	Aluminum
				36	2	M10x25 v1	Steel
				37	2	M3X8 v1	Steel
				38	2	Panasonic_abv161 2 v1	Steel
				39	1	Soporte_microswit ch_Z v1	Steel
				40	1	Soporte_microswit ch_Z2 v1	Steel
				41	1	PE2R-070_1ST_8-P0411101501 v1	Steel
				42	1	GESM14 F16C F16C v1	Steel
				43	1	VK MTJ65 APEXDYN AER070 GESM14 SAM427 KPL v1	Steel
				44	4	P_SeparadorCaja v1	Aluminum
				45	2	Pieza_microswitch v1	Aluminum
				46	1	0_823m_B17i_3_0 48_0_117_3_12 P_A1_5 v1	Steel
				47	1	Soporte_cadena_p ortacables v1	Aluminum

**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

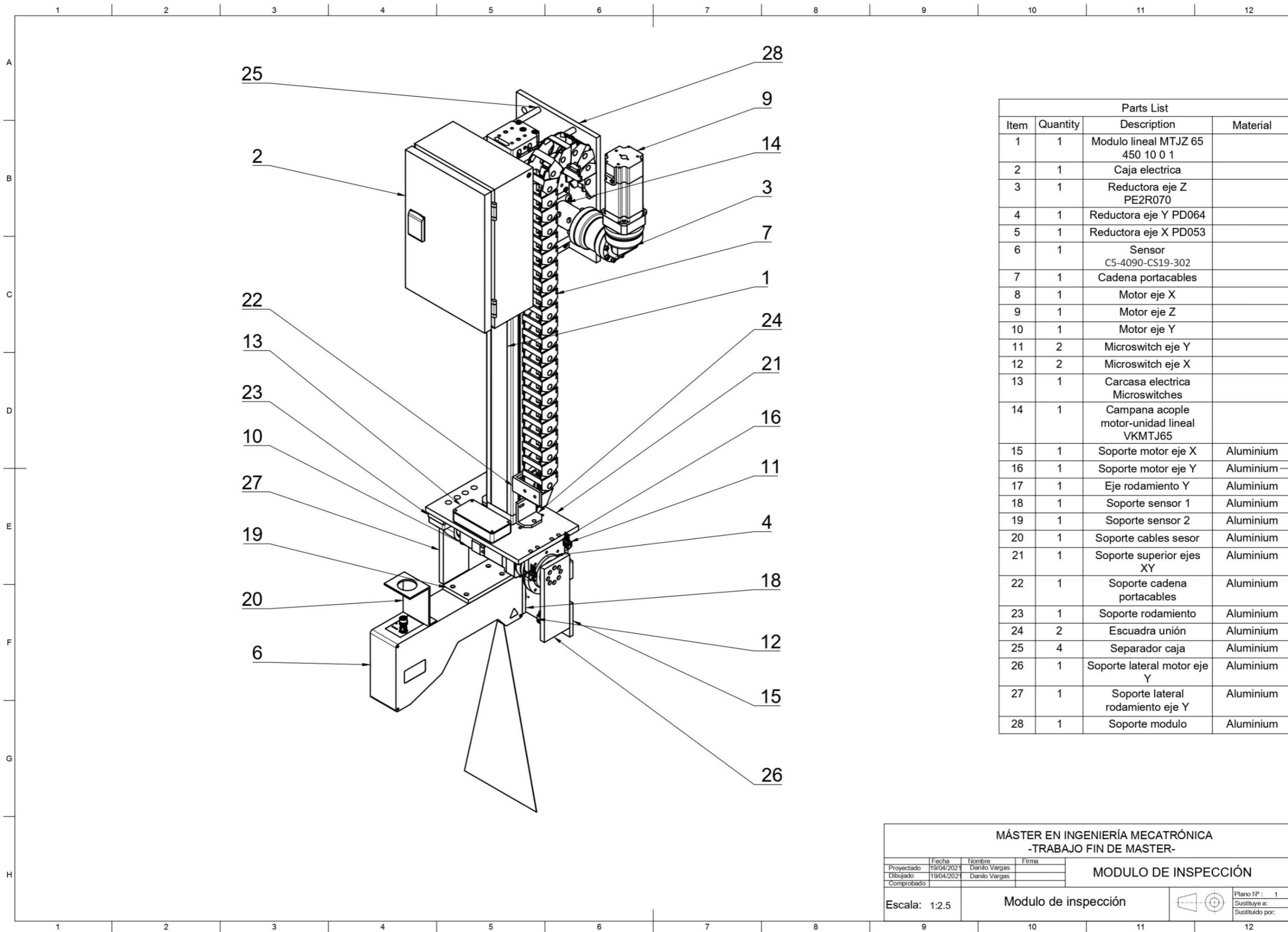
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma
Trabaja	12/04/2022	Danielo Vargas	
Comprobado			

**MODULO DE INSPECCIÓN**

Escala: 1:4.5      Modulo explosionado

Plano N°:  
Sustituye a:  
Sustituido por:





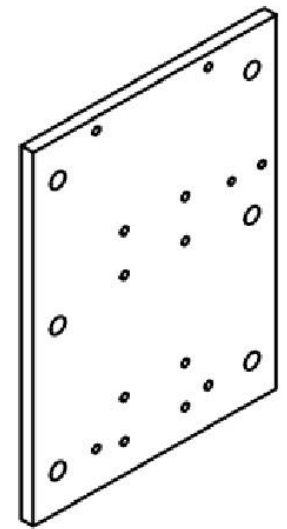
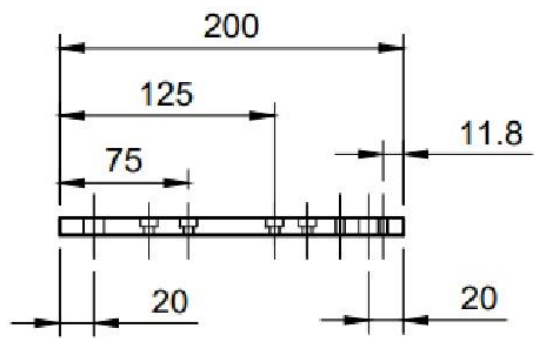
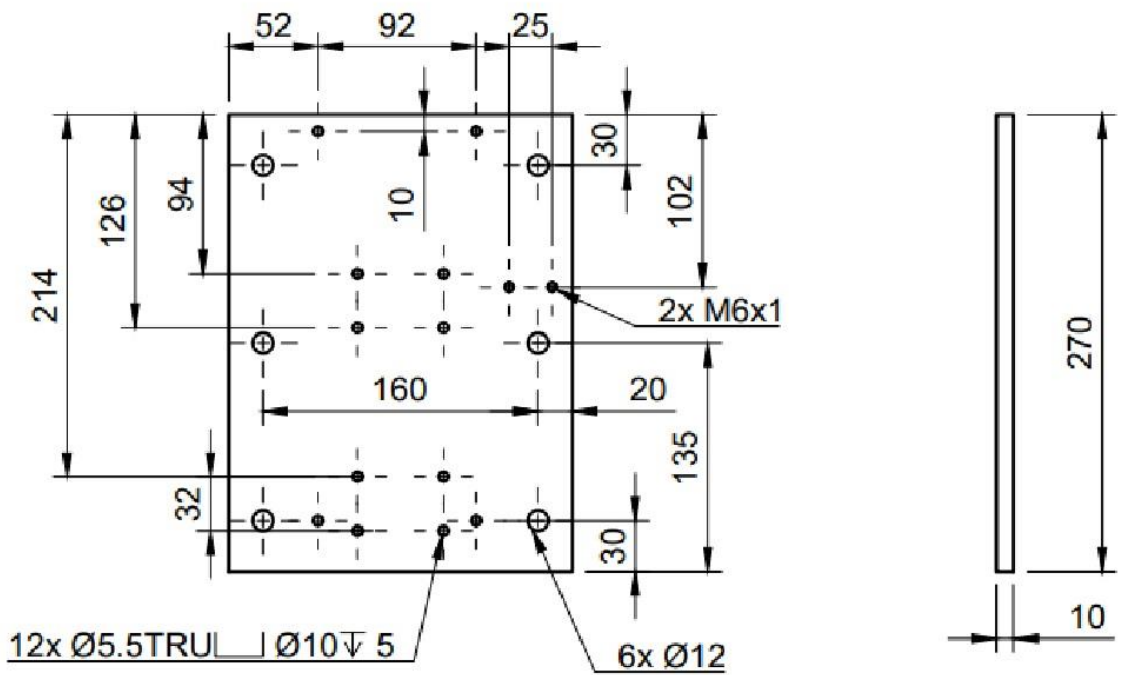
Parts List			
Item	Quantity	Description	Material
1	1	Modulo lineal MTJZ 65 450 10 0 1	
2	1	Caja electrica	
3	1	Reductora eje Z PE2R070	
4	1	Reductora eje Y PD064	
5	1	Reductora eje X PD053	
6	1	Sensor C5-4090-CS19-302	
7	1	Cadena portacables	
8	1	Motor eje X	
9	1	Motor eje Z	
10	1	Motor eje Y	
11	2	Microswitch eje Y	
12	2	Microswitch eje X	
13	1	Carcasa electrica Microswitches	
14	1	Campana acople motor-unidad lineal VKMTJ65	
15	1	Soporte motor eje X	Aluminium
16	1	Soporte motor eje Y	Aluminium
17	1	Eje rodamiento Y	Aluminium
18	1	Soporte sensor 1	Aluminium
19	1	Soporte sensor 2	Aluminium
20	1	Soporte cables sesor	Aluminium
21	1	Soporte superior ejes XY	Aluminium
22	1	Soporte cadena portacables	Aluminium
23	1	Soporte rodamiento	Aluminium
24	2	Escuadra unión	Aluminium
25	4	Separador caja	Aluminium
26	1	Soporte lateral motor eje Y	Aluminium
27	1	Soporte lateral rodamiento eje Y	Aluminium
28	1	Soporte modulo	Aluminium

**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-**

Proyectado	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	19/04/2021	Daniilo Vargas	
Comprobado	19/04/2021	Daniilo Vargas	

**MODULO DE INSPECCIÓN**

Escala: 1:2.5      Modulo de inspección           Plano Nº: 1  
 Sustituye a:      Sustituido por:



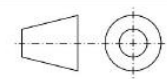
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

MODULO DE INSPECCIÓN

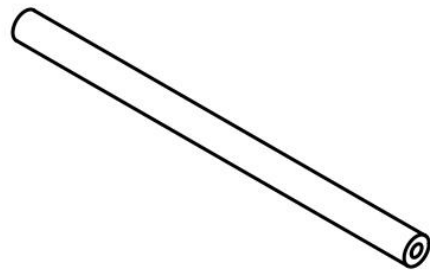
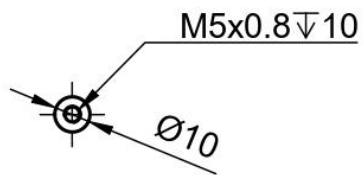
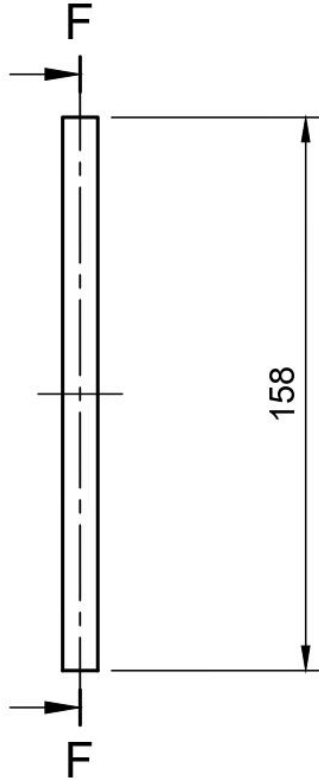
Escala: 1:4

Soporte Modulo



Plano N°: 2
Sustituye a:
Sustituido por:

F-F (1:2)



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

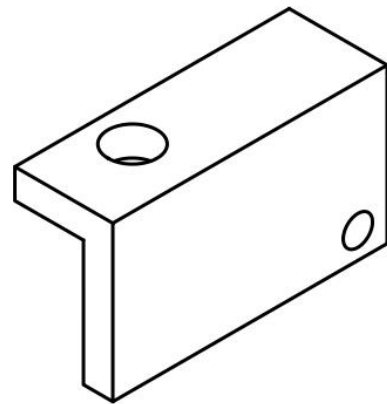
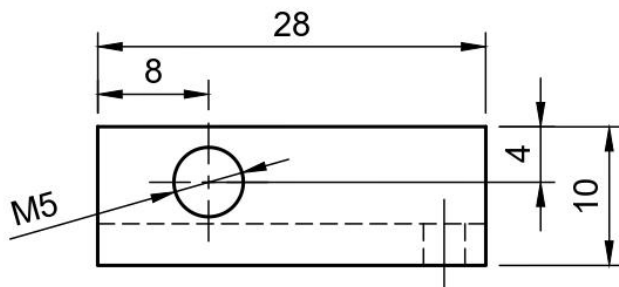
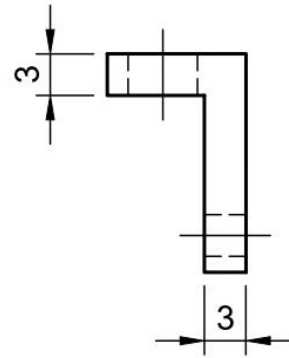
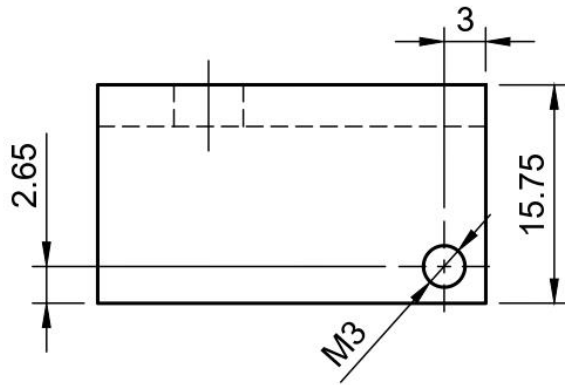
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

Separador Caja



Plano N° : 3  
Sustituye a:  
Sustituido por:



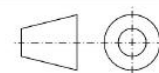
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

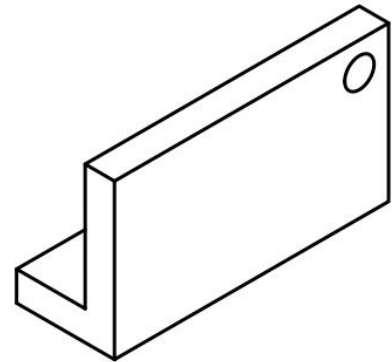
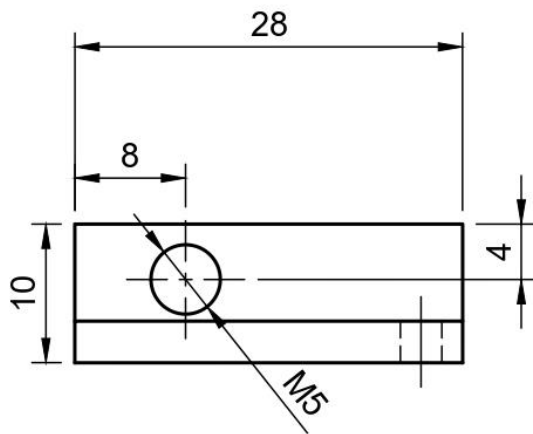
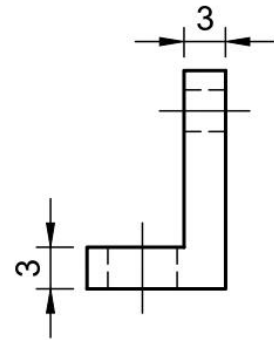
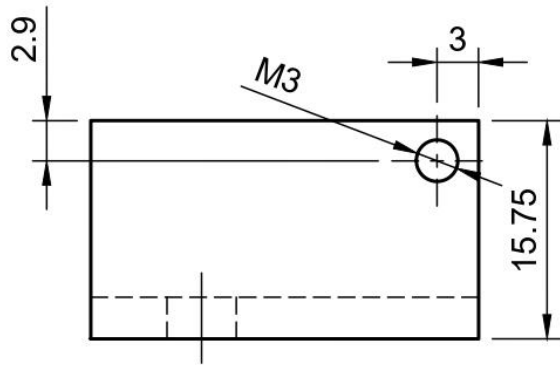
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 2:1

Soporte microswitch eje Z(Inferior)



Plano N° : 4  
Sustituye a:  
Sustituido por:



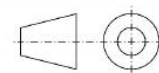
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Daniilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Daniilo Vargas	
Comprobado			

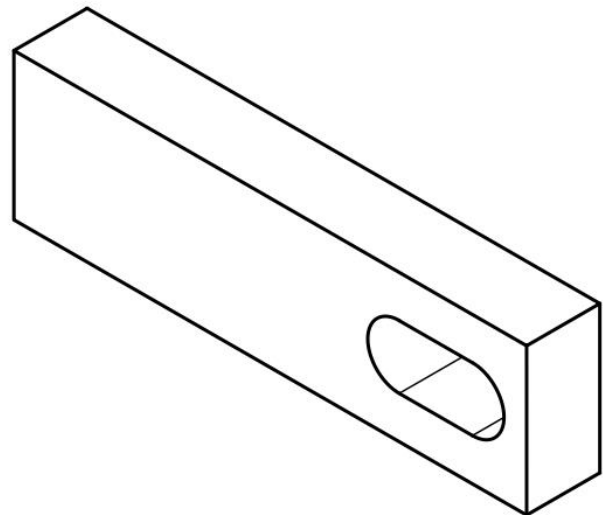
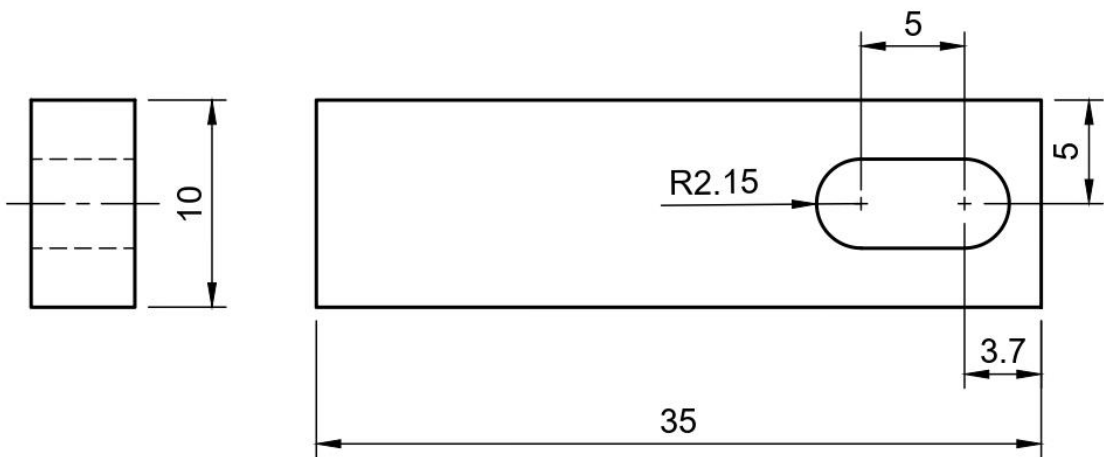
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 2:1

Soporte microswitch eje Z(superior)



Plano N° : 5  
Sustituye a:  
Sustituido por:



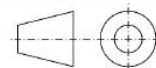
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

PI2021101-01\_CIN

Escala: 3:1

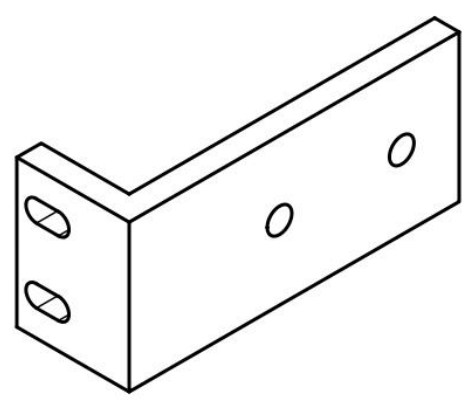
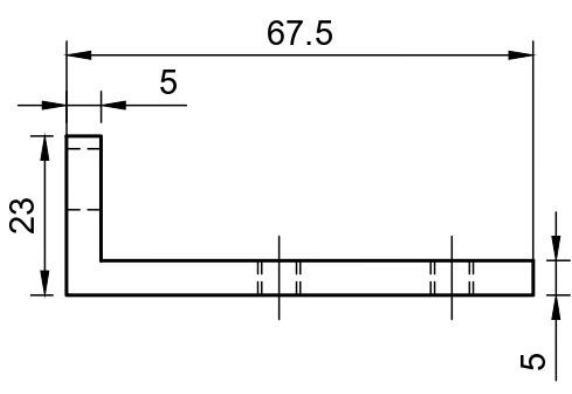
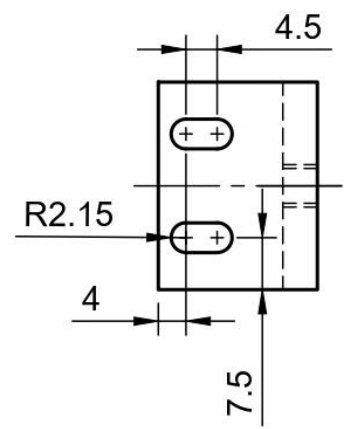
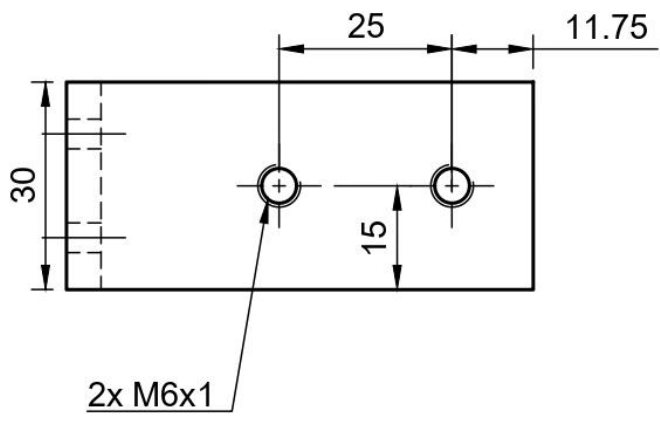
Pieza microswitch



Plano N° : 6

Sustituye a:

Sustituido por:



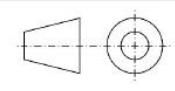
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

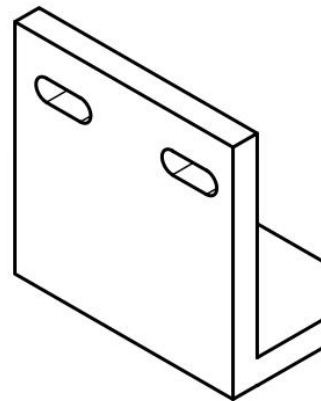
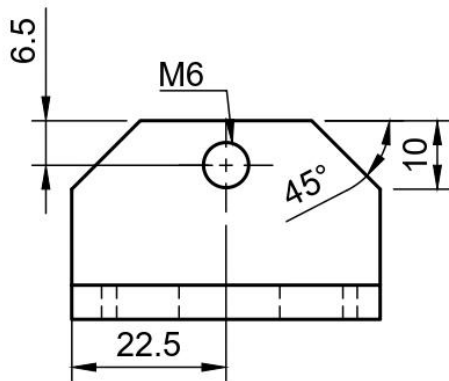
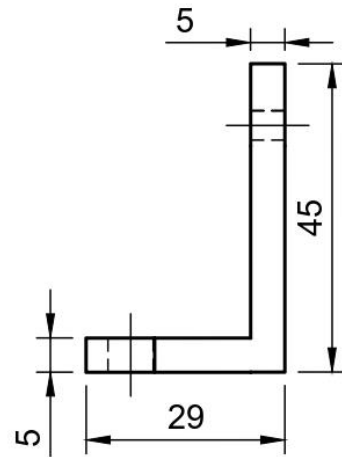
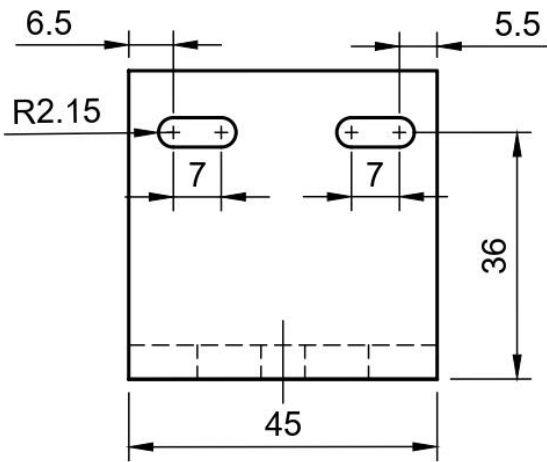
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:1

Soporte Cadena Portacables



Plano N° : 7  
Sustituye a:  
Sustituido por:



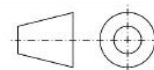
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Daniilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Daniilo Vargas	
Comprobado			

MODULO DE INSPECCIÓN

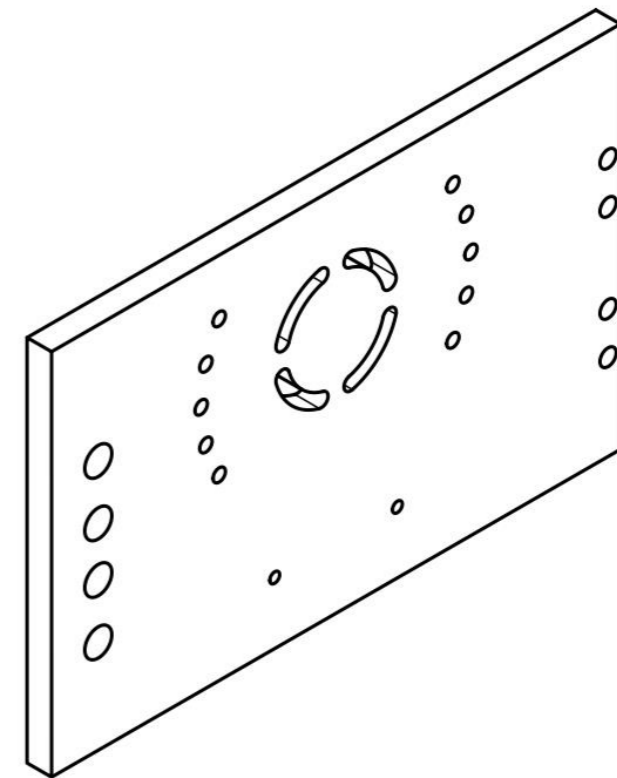
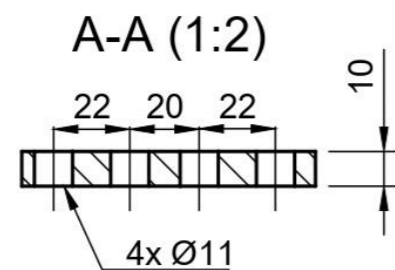
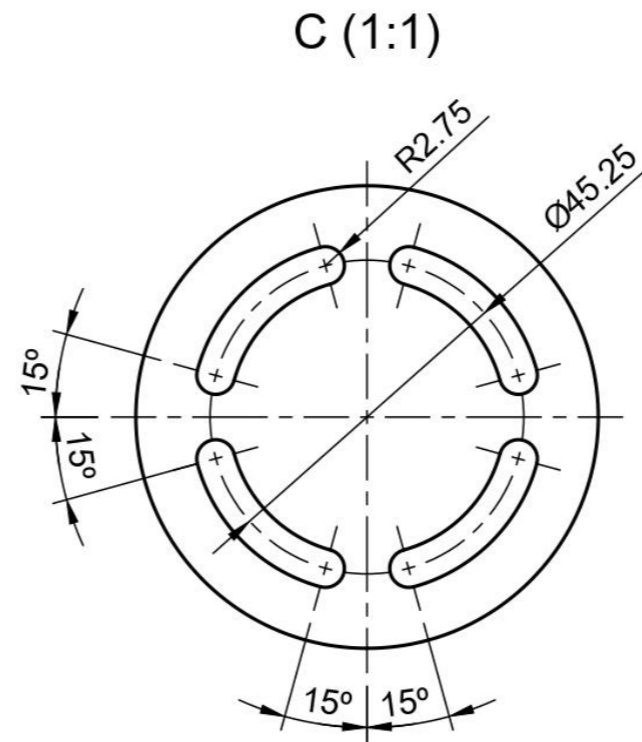
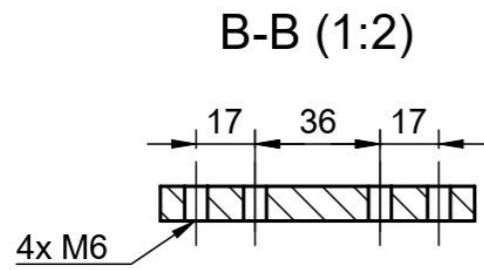
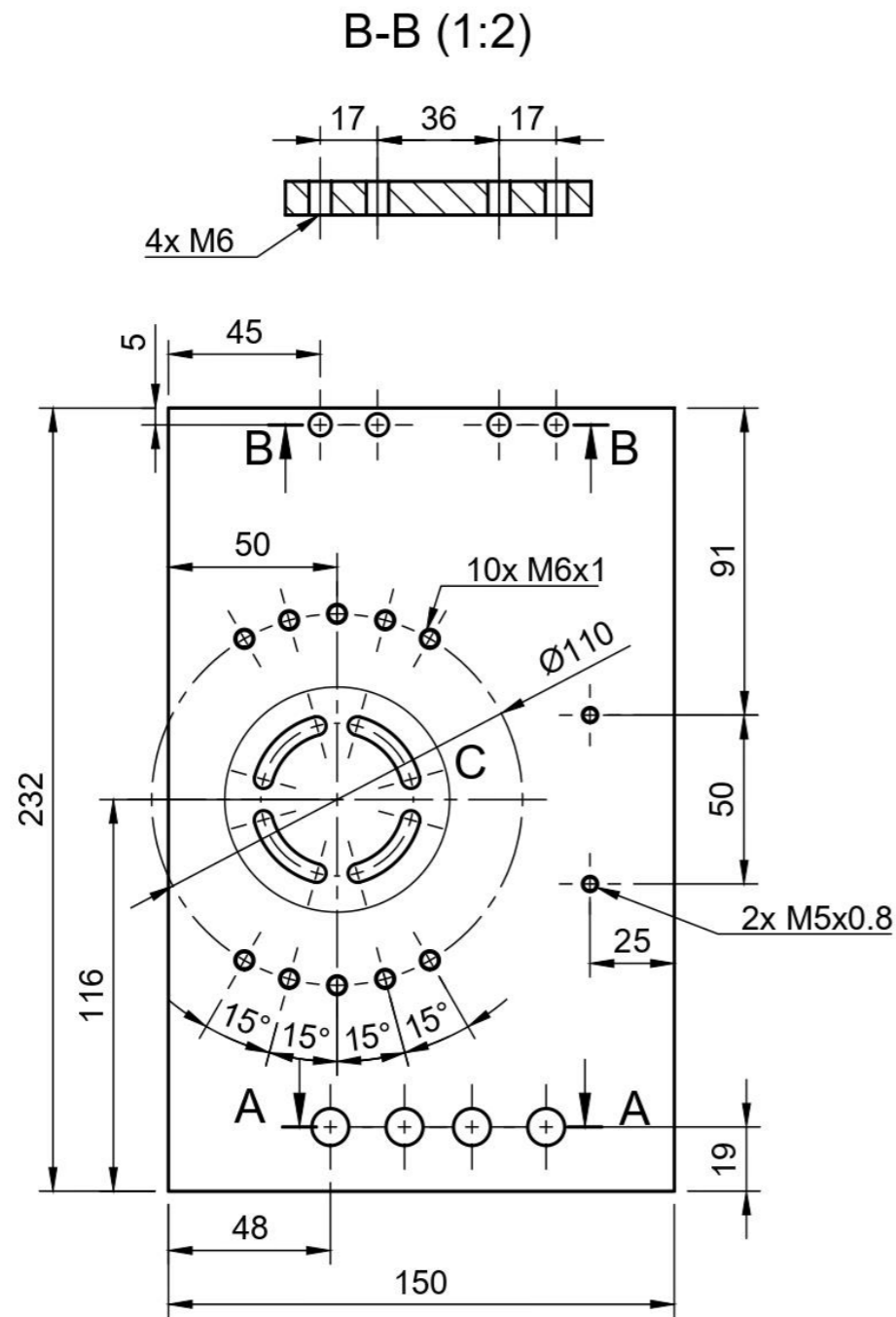
Escala: 1:1

Escuadra unión

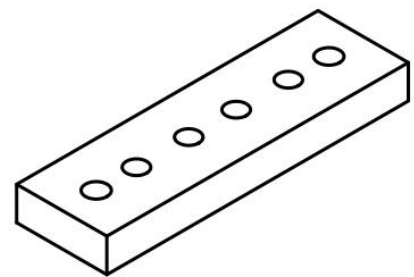
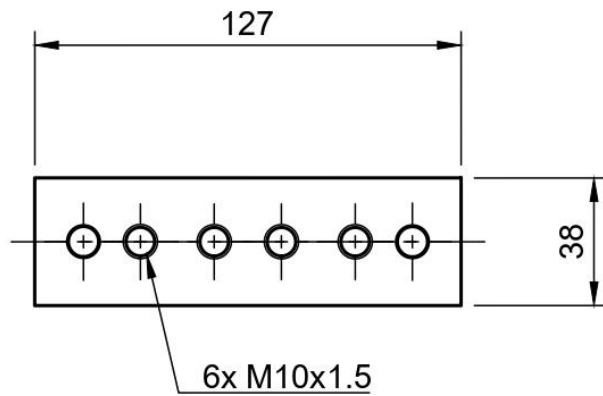
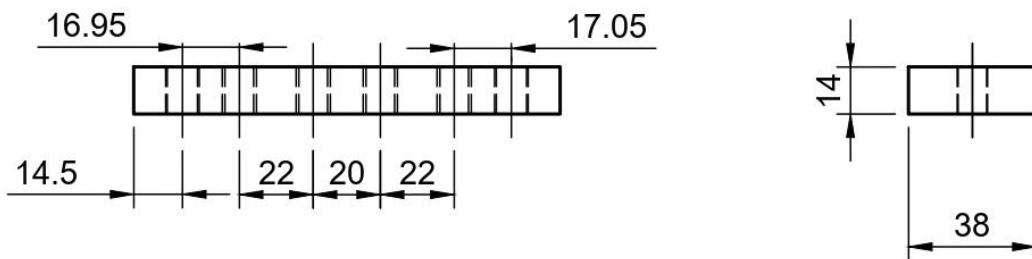


Plano N° : 8  
Sustituye a:  
Sustituido por:





MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA -TRABAJO FIN DE MASTER-			
Proyectado	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Escala: 1:2			Soporte superior ejes XY
			Plano N°: 9
			Sustituye a:
			Sustituido por:



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

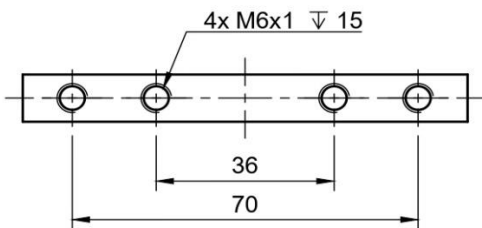
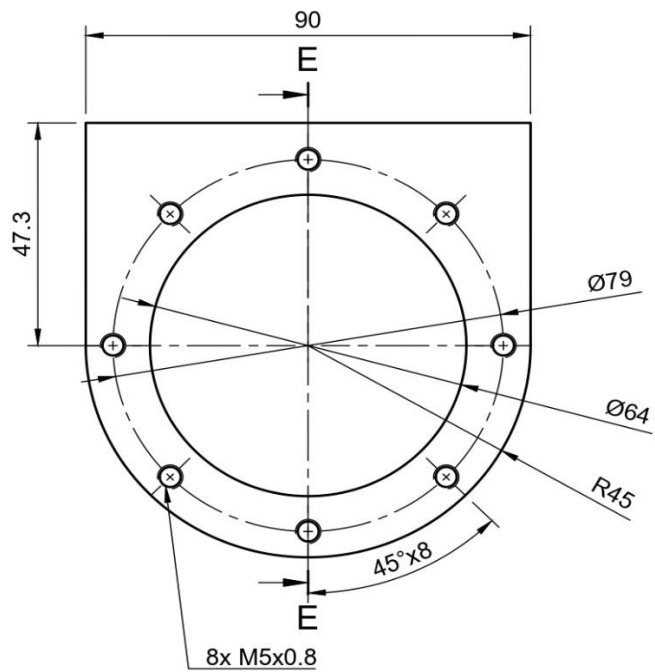
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

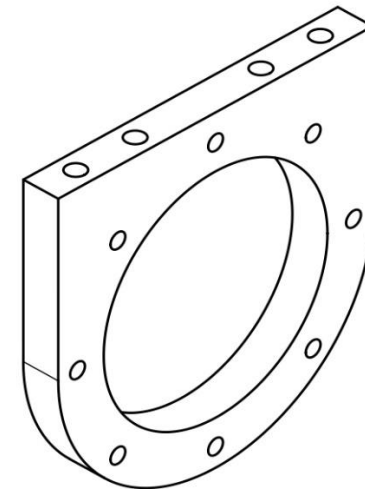
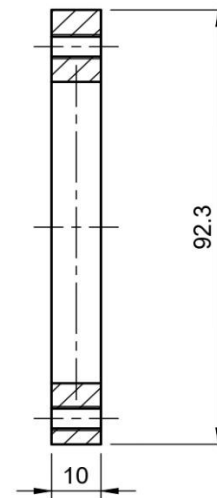
Soporte Rodamiento



Plano N° : 10  
Sustituye a:  
Sustituido por:



E-E (1:1)



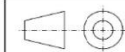
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Daniilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Daniilo Vargas	
Comprobado			

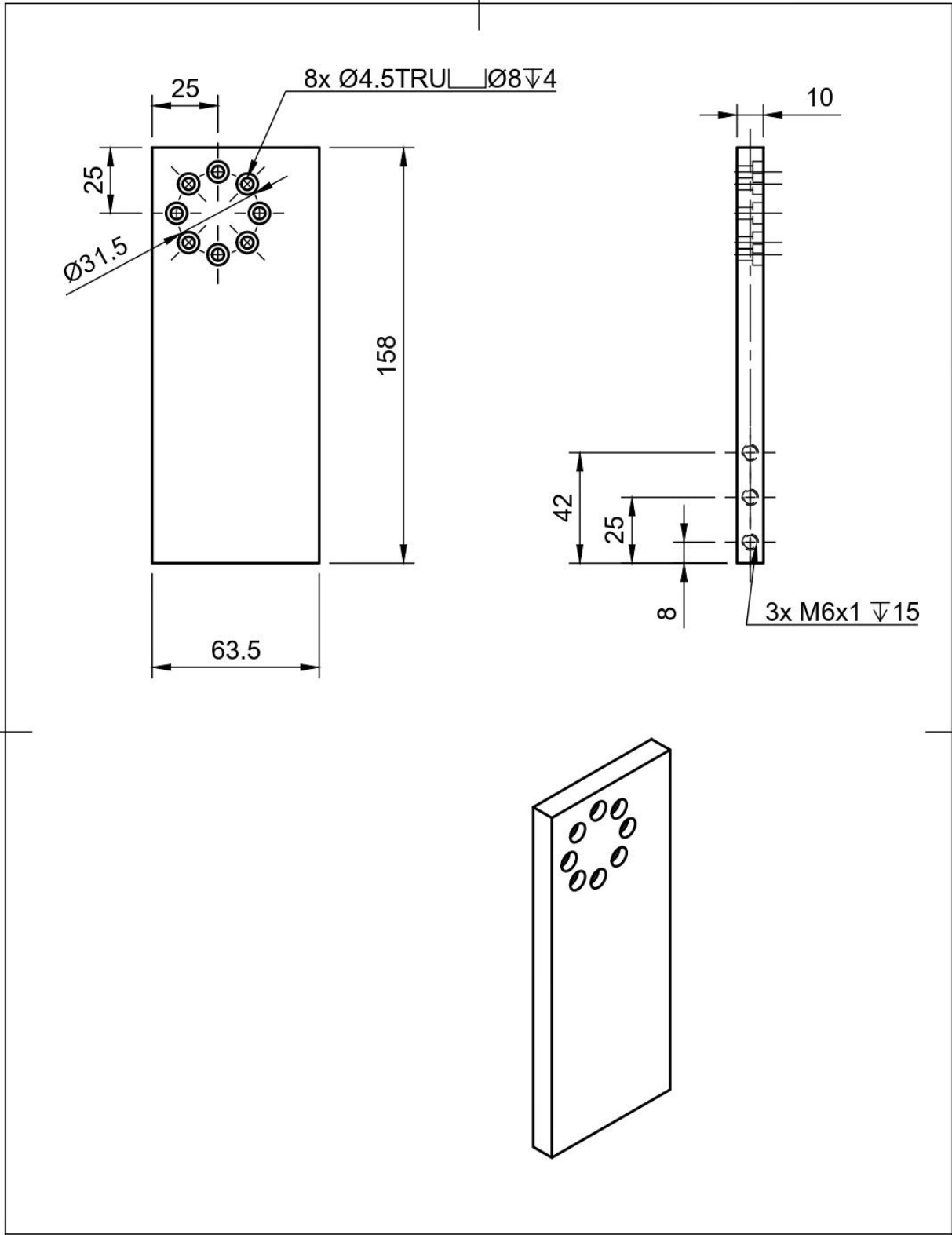
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:1

Soporte Motor eje Y



Plano Nº: 11  
Sustituye a:  
Sustituido por:



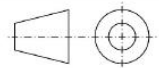
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

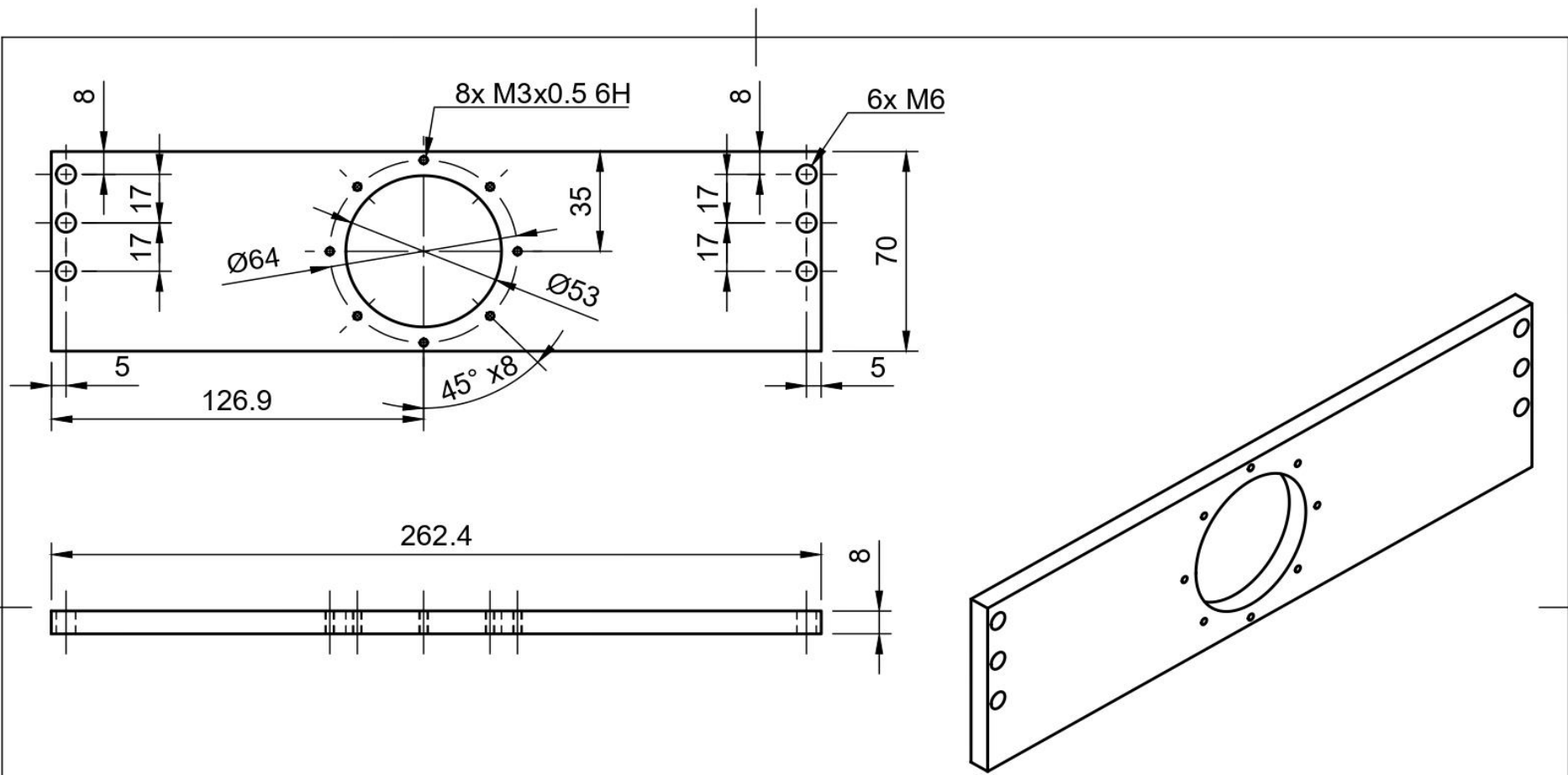
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

Soporte Lateral Motor eje Y



Plano N° : 12
Sustituye a:
Sustituido por:



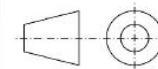
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

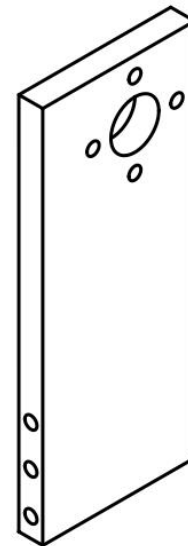
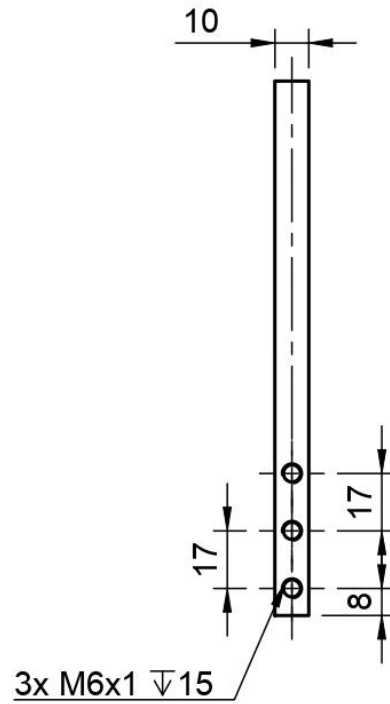
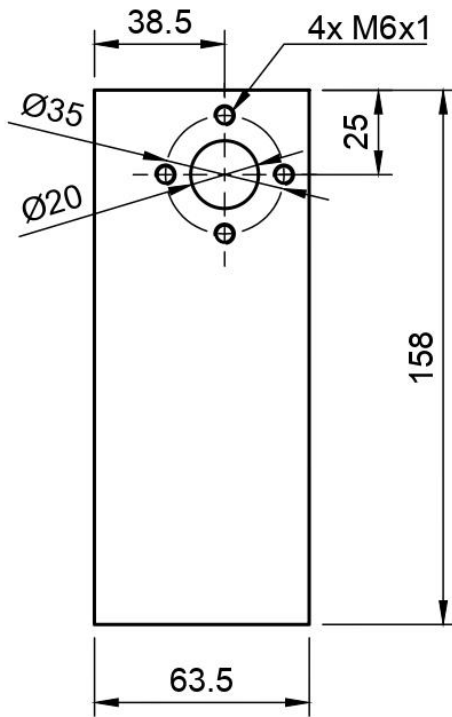
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

Soporte Motor eje X



Plano N° : 13  
Sustituye a:  
Sustituido por:



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
- TRABAJO FIN DE MASTER -

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

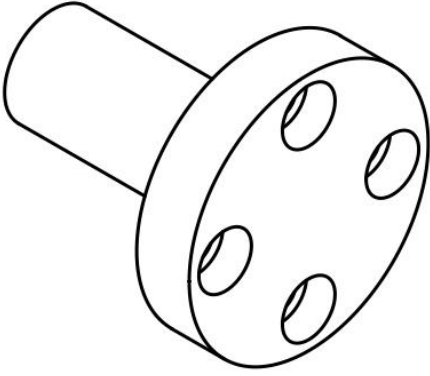
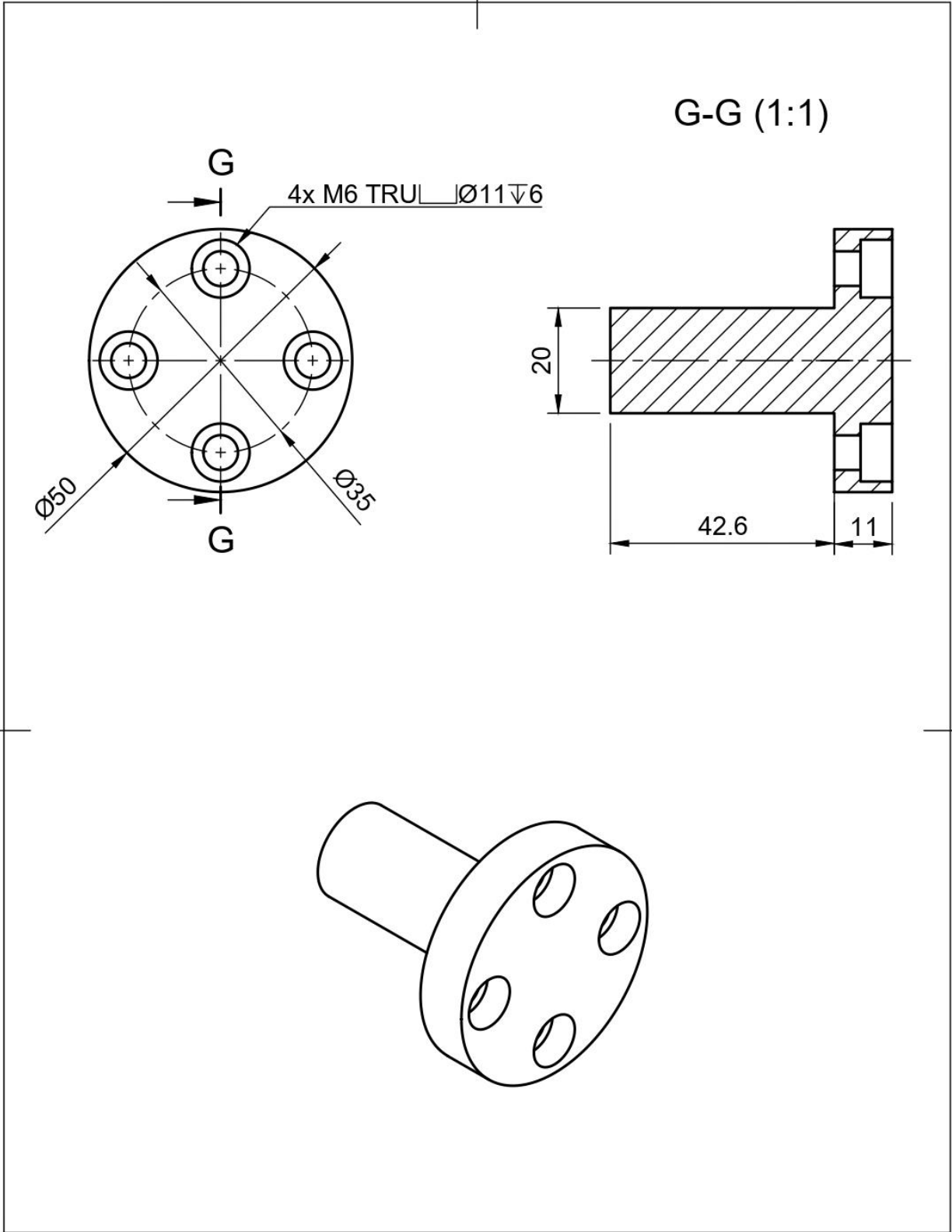
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

Soporte Lateral Rodamiento eje Y



Plano Nº : 14  
Sustituye a:  
Sustituido por:

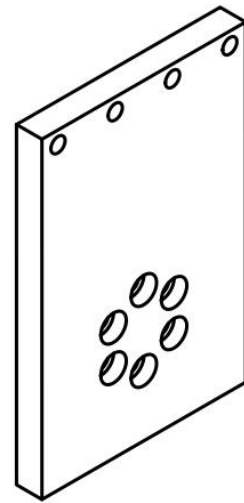
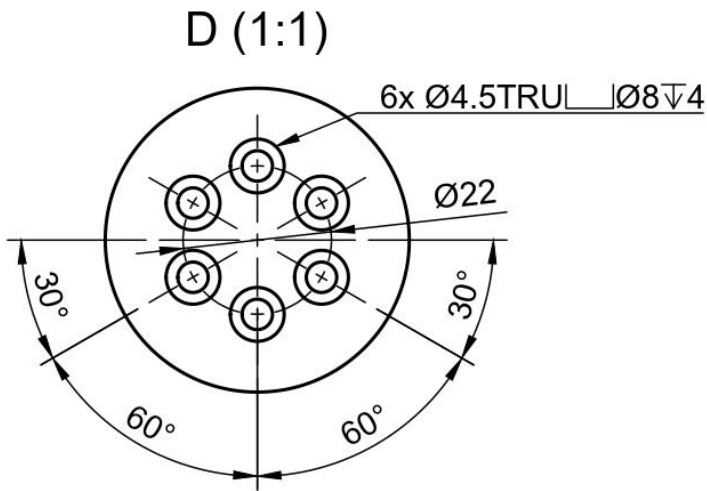
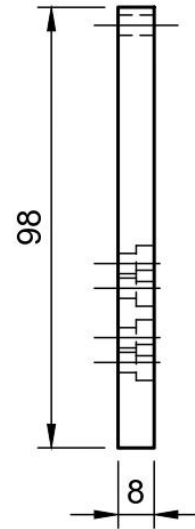
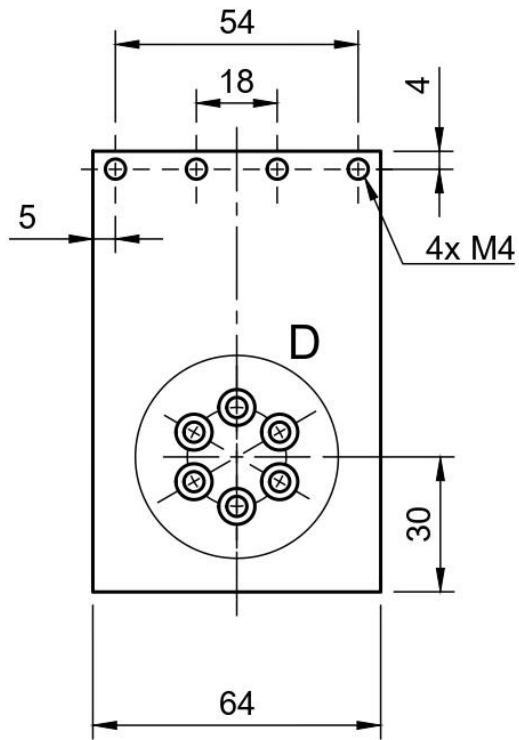


**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-**

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

**MODULO DE INSPECCIÓN**

<b>Escala:</b> 1:1	<b>Eje rodamiento Y</b>		Plano Nº: 15
			Sustituye a:
			Sustituido por:



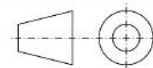
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

MODULO DE INSPECCIÓN

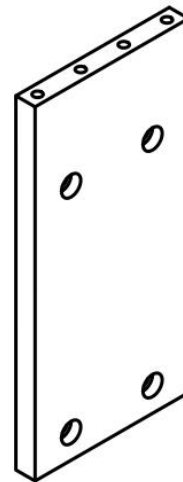
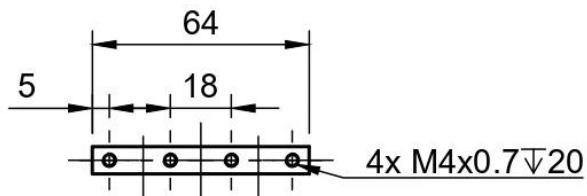
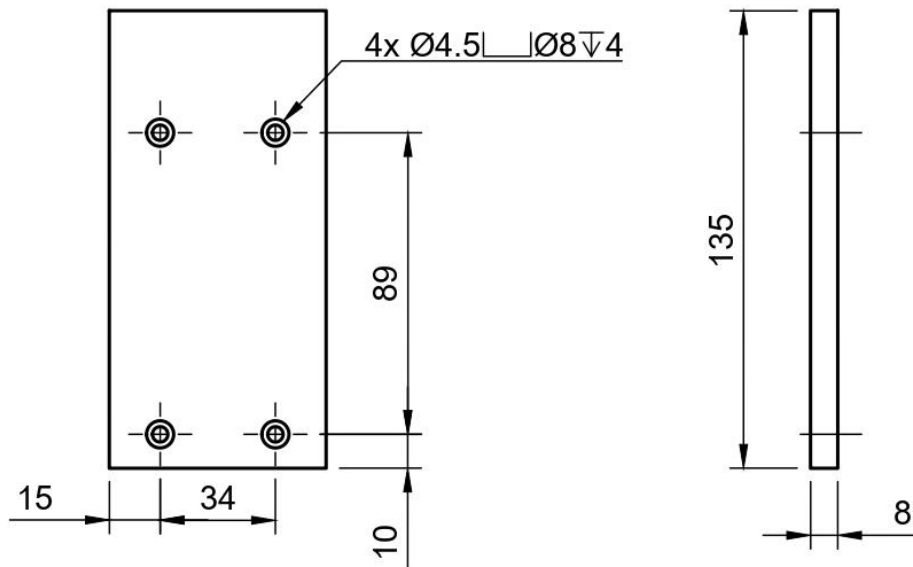
Escala: 1:1.5

Soporte Sensor 1



Plano N° : 16  
Sustituye a:  
Sustituido por:





MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

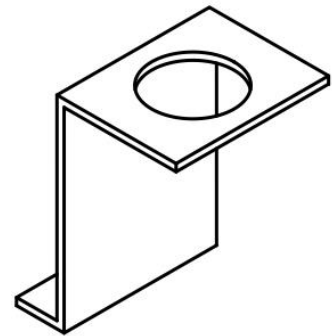
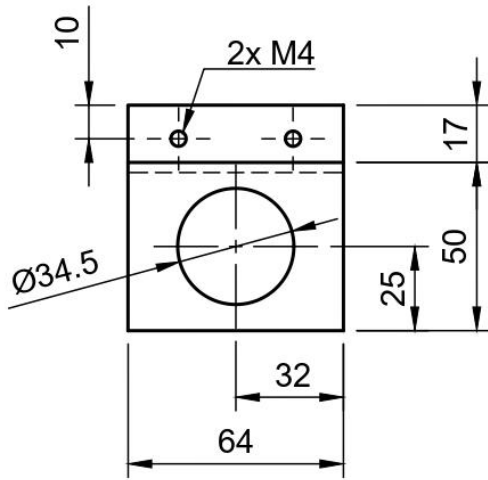
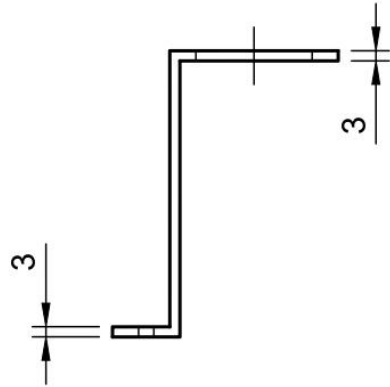
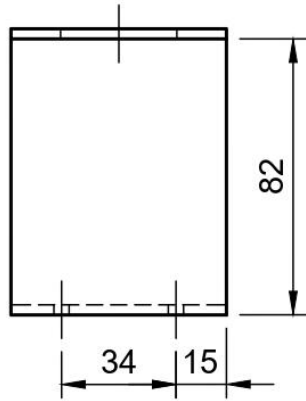
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

Soporte Sensor 2



Plano N° : 17  
Sustituye a:  
Sustituido por:



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Dibujado	12/04/2021	Danilo Vargas	
Comprobado			

MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:2

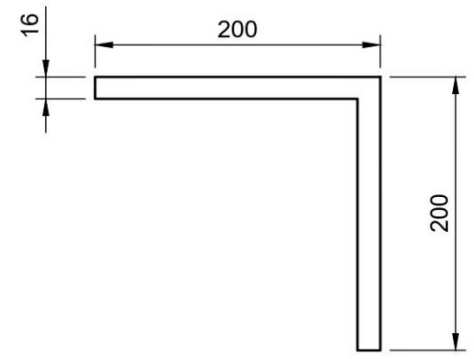
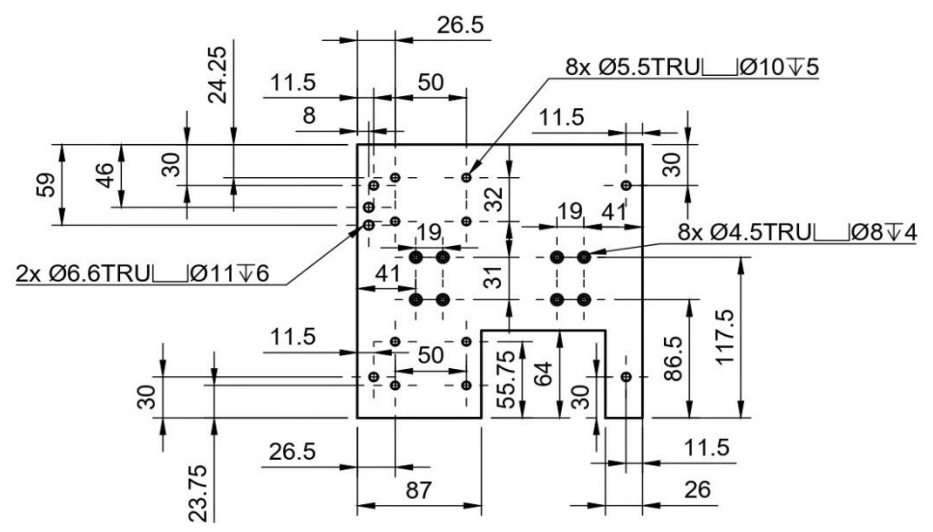
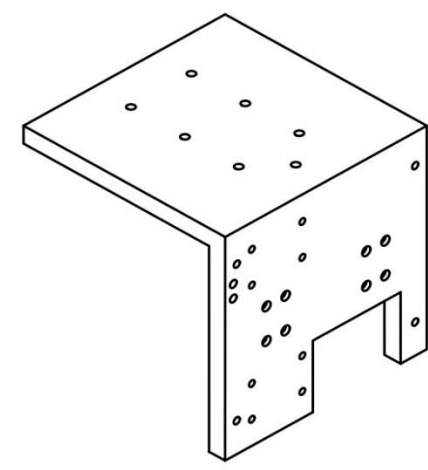
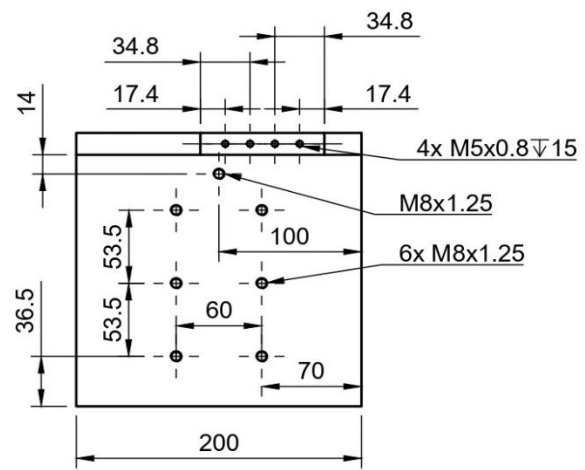
Soporte Cables Sensor



Plano N° : 18  
Sustituye a:  
Sustituido por:

1 2 3 4 5 6 7 8

A  
B  
C  
D  
E  
F



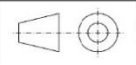
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

Proyectado	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	03/05/2021	Daniilo Vargas	
Comprobado			

MODULO DE INSPECCIÓN

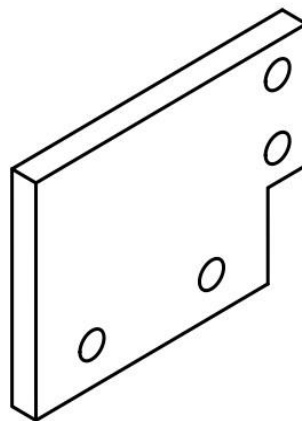
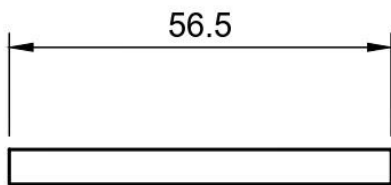
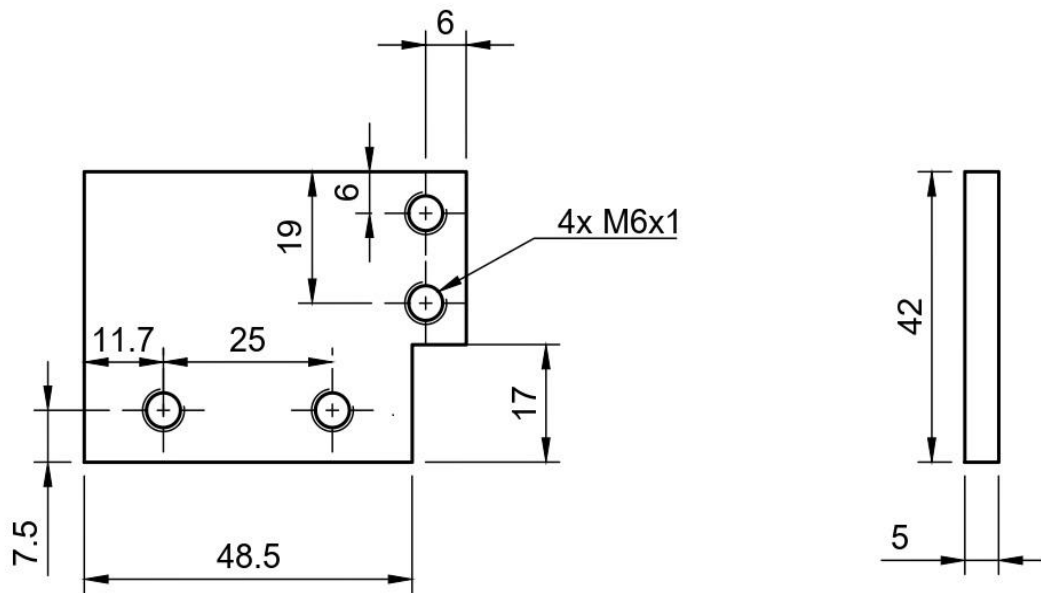
Escala: 1: 3.5

Soporte Modulo Movil



Plano N°:  
Sustituye a:  
Sustituido por:

1 2 3 4 5 6 7 8



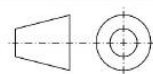
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

Proyectado	Fecha	Nombre	Firma
	03/05/2021	Danilo Vargas	
Dibujado			
Comprobado			

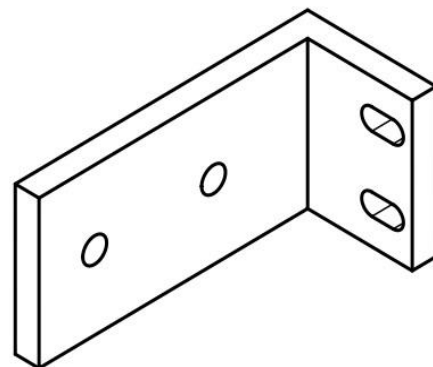
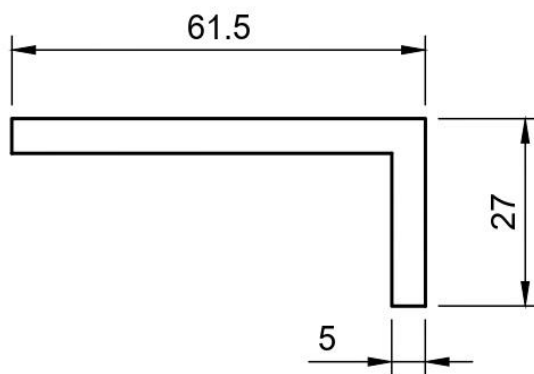
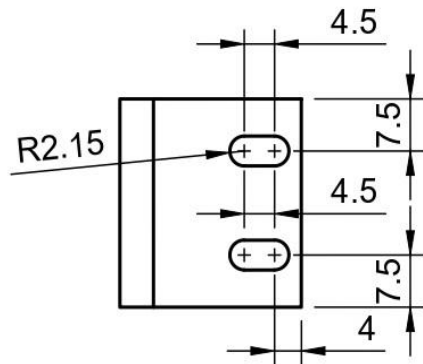
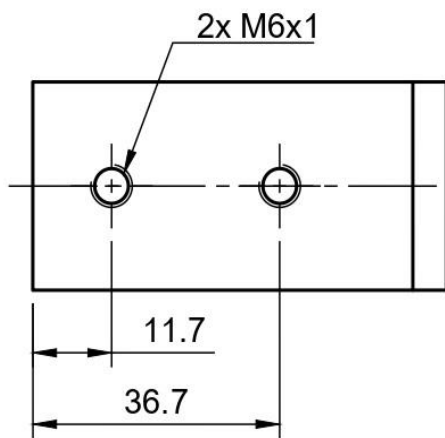
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:1

Soporte Cadena portacables M1



Plano N° :  
Sustituye a:  
Sustituido por:



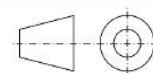
MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	03/05/2021	Danilo Vargas	
Dibujado			
Comprobado			

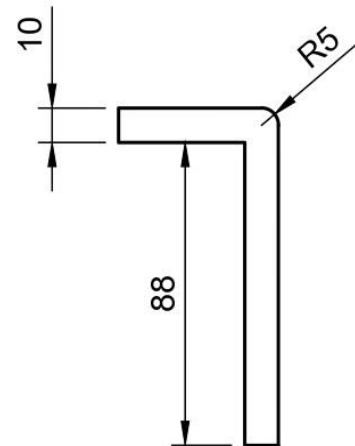
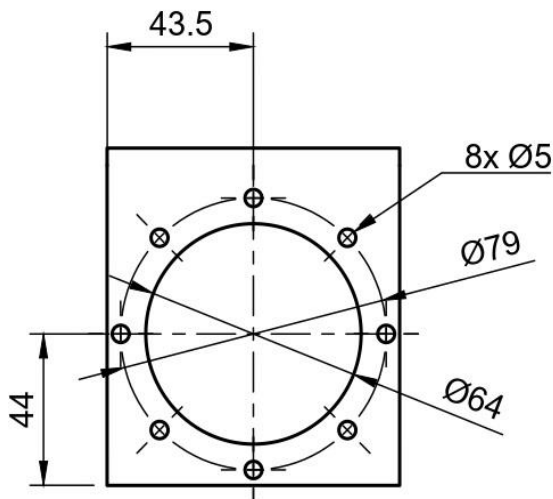
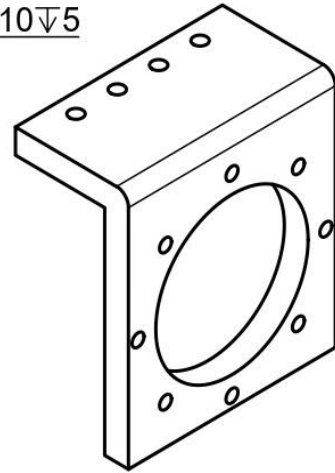
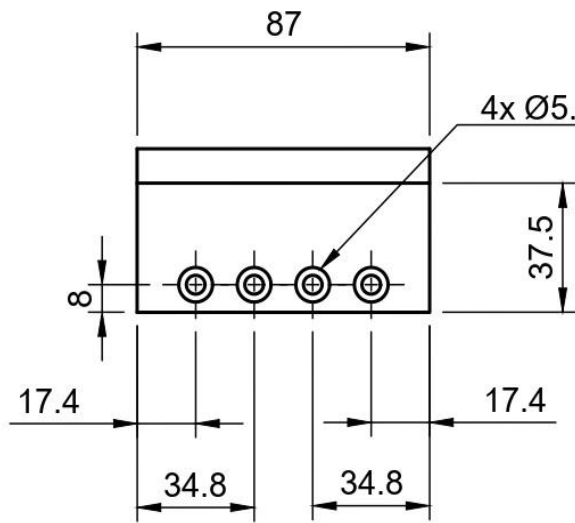
MODULO DE INSPECCIÓN

Escala: 1:1

Soporte Cadena portacables M2



Plano N° :  
Sustituye a:  
Sustituido por:



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA  
-TRABAJO FIN DE MASTER-

	Fecha	Nombre	Firma
Proyectado	03/05/2021	Danilo Vargas	
Dibujado			
Comprobado			

MODULO DE INSPECCIÓN

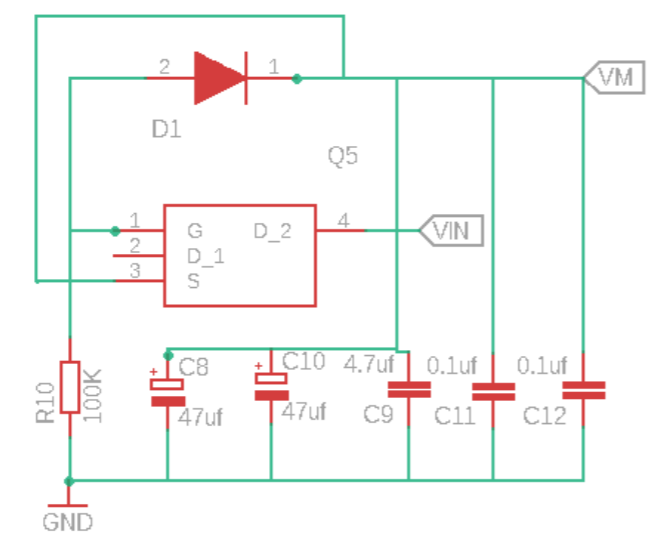
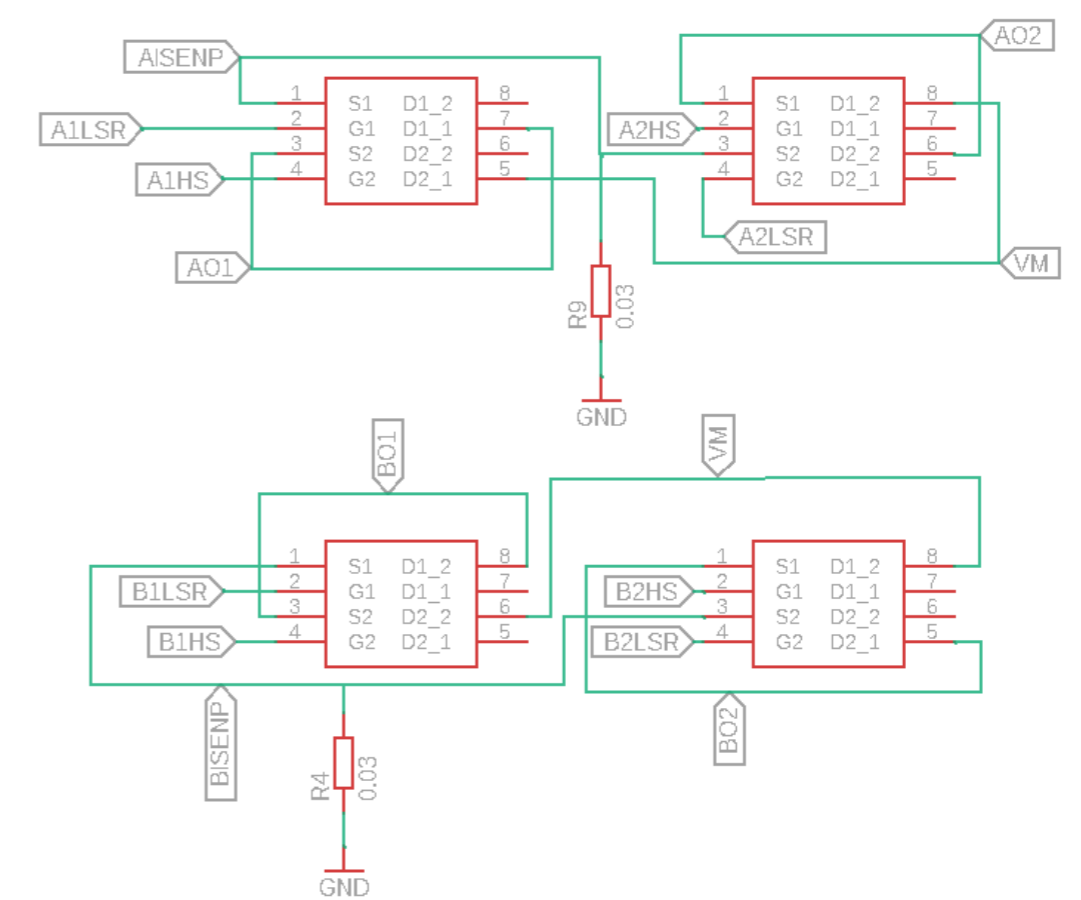
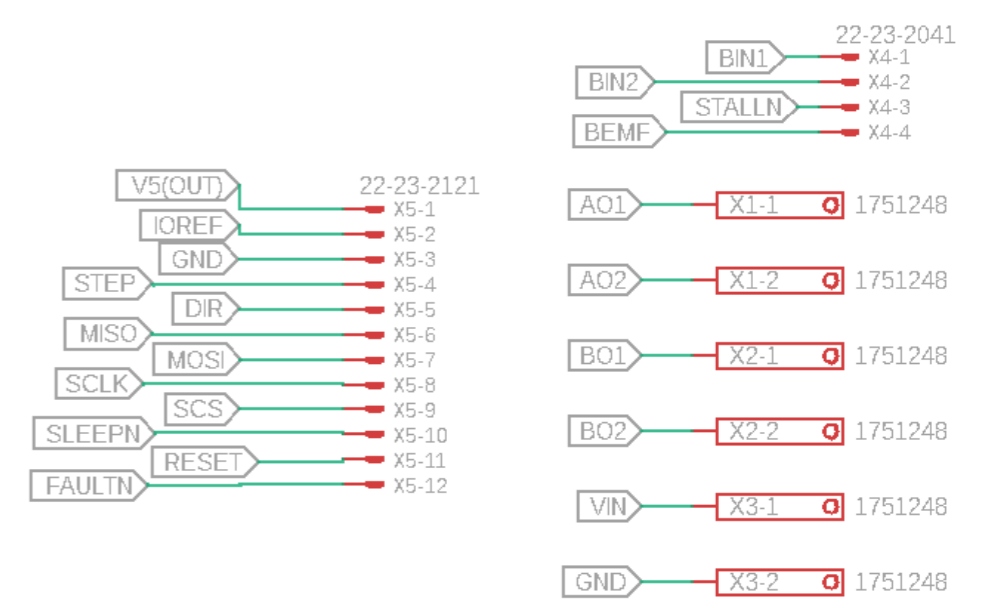
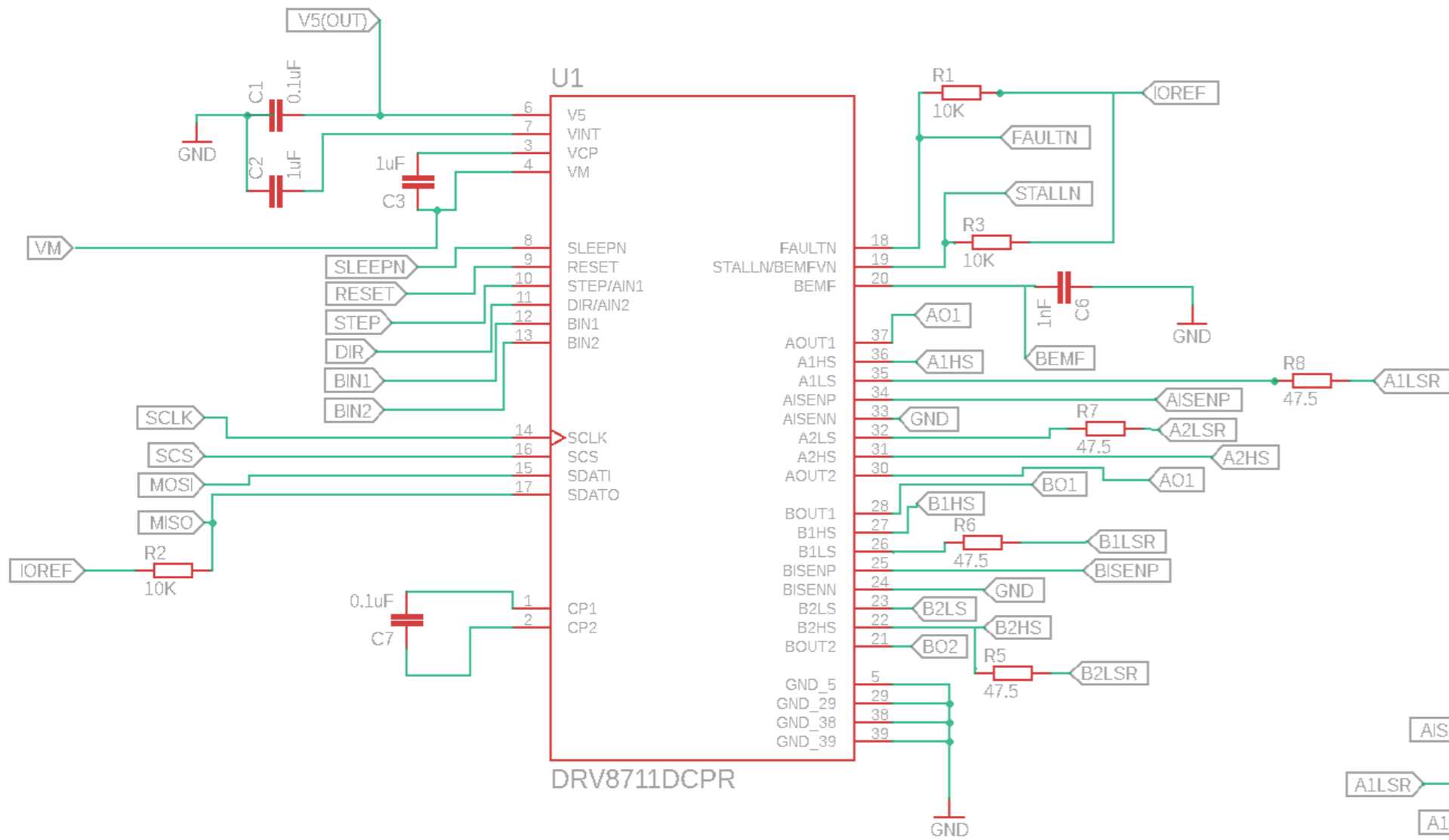
Escala: 1:2

Soporte Motor cremallera



Plano N° :  
Sustituye a:  
Sustituido por:

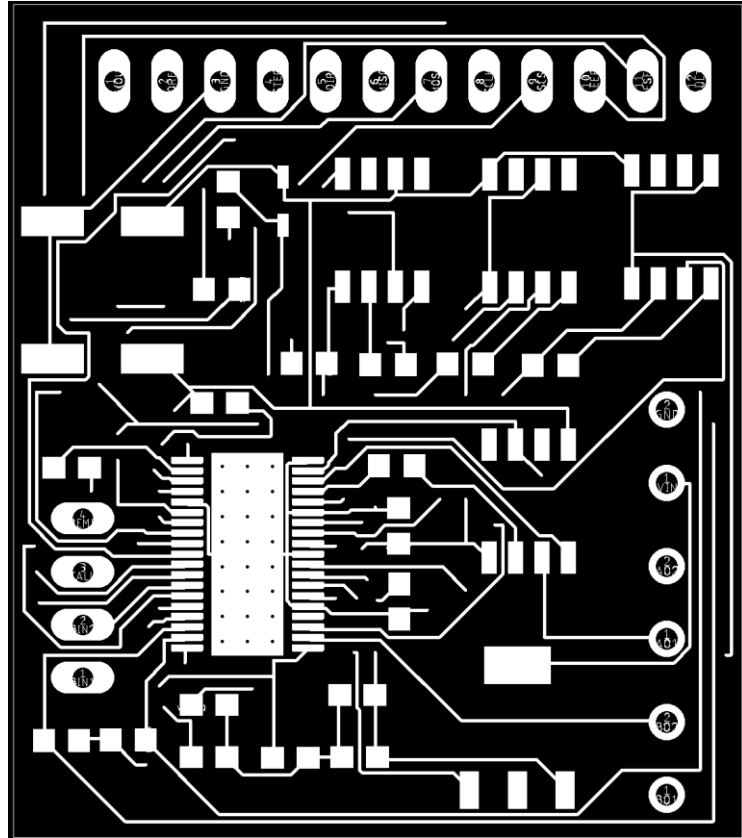
**ANEXO 2**  
**ESQUEMA ELECTRONICO**



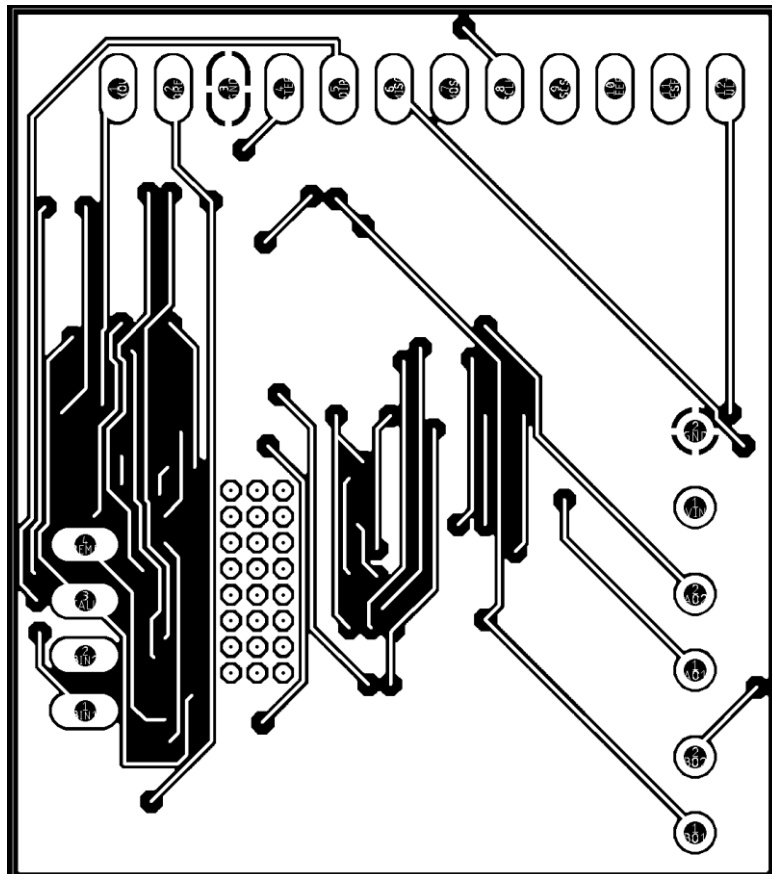


**ANEXO 3**  
**TRAZADO DE PISTAS**

**CARA SUPERIOR**



**CARA INFERIOR**



**ANEXO 4**  
**CODIGO TEENSY CON ACCELSTEPPER**

```

#include <AccelStepper.h>
#include "HighPowerStepperDriver2.h"
#include "EasyCAT.h" // EasyCAT library to interface the LAN9252
#include <SPI.h> // SPI library
#define PIN_SPI_ETHERCAT_CS 10
#define PIN_SPI_ETHERCAT_MOSI 11
#define PIN_SPI_ETHERCAT_MISO 12
#define PIN_SPI_ETHERCAT_CLOCK 13
const uint8_t DirPin = 2;
const uint8_t StepPin = 3;
const uint8_t CSPin = 4;
const uint8_t DirPin2 = 5;
const uint8_t StepPin2 = 6;
const uint8_t CSPin2 = 7;
EasyCAT EASYCAT (PIN_SPI_ETHERCAT_CS, ASYNC); // EasyCAT instantiation
AccelStepper stepper1(AccelStepper::DRIVER, StepPin, DirPin);
AccelStepper stepper2(AccelStepper::DRIVER, StepPin2, DirPin2);
HighPowerStepperDriver M1;
HighPowerStepperDriver M2;

//--- sanity check to see if the EasyCAT is set in STANDARD MODE -----
#ifdef CUST_BYTE_NUM_OUT
#error "The EasyCAT must be set in STANDARD MODE !!!"
#endif
#ifdef CUST_BYTE_NUM_IN
#error "The EasyCAT must be set in STANDARD MODE !!!"
#endif

//---- global variables -----
unsigned long Millis = 0;
//unsigned long micro,micro2 = 0;
unsigned long PreviousMillis = 0;

//---- setup -----
void setup()
{
  SPI.begin();
  SPI1.begin();
  M1.setChipSelectPin(CSPin);
  M2.setChipSelectPin(CSPin2);
  // Drive the STEP and DIR pins low initially.
  pinMode(StepPin, OUTPUT);
  digitalWrite(StepPin, LOW);
  pinMode(DirPin, OUTPUT);
  digitalWrite(DirPin, LOW);
  Serial.begin(9600); // serial line initialization
  pinMode(StepPin2, OUTPUT);
  digitalWrite(StepPin2, LOW);
  pinMode(DirPin2, OUTPUT);
  digitalWrite(DirPin2, LOW);
  Serial.begin(9600);
}

```

```

// (used only for debug)
// Give the driver some time to power up.
delay(1);
// Reset the driver to its default settings and clear latched status
// conditions.
M1.resetSettings();
M1.clearStatus();
M2.resetSettings();
M2.clearStatus();
// Select auto mixed decay. TI's DRV8711 documentation recommends this mode
// for most applications, and we find that it usually works well.
M1.setDecayMode(HPSDDecayMode::AutoMixed);
M2.setDecayMode(HPSDDecayMode::AutoMixed);

// Set the current limit. You should change the number here to an appropriate
// value for your particular system.
M1.setCurrentMilliamps36v4(1000);
M2.setCurrentMilliamps36v4(1000);

// Set the number of microsteps that correspond to one full step.
M1.setStepMode(HPSDStepMode::MicroStep16);
M2.setStepMode(HPSDStepMode::MicroStep8);

// Enable the motor outputs.
M1.enableDriver();
M2.enableDriver();

stepper1.setMaxSpeed(20000.0);
stepper1.setAcceleration(28000.0);
stepper1.moveTo(32000);

stepper2.setMaxSpeed(12000.0);
stepper2.setAcceleration(18000.0);
stepper2.moveTo(16000);

Serial.print ("\nEasyCAT - Generic EtherCAT slave\n"); // print the banner
delay(50);

//---- initialize the EasyCAT board ----

if (EASYCAT.Init() == true) // initialization
{ // successfully completed
  Serial.print ("initialized"); //
} //
else // initialization failed
{ // the EasyCAT board was not recognized
  Serial.print ("initialization failed"); //
  // The most common reason is that the SPI
  // chip select chosen on the board doesn't
  // match the one chosen by the firmware

  pinMode(13, OUTPUT); // stay in loop for ever
  // with the Arduino led blinking
  while(1) //
  { //

```

```

digitalWrite (13, LOW);           //
delay(500);                       //
digitalWrite (13, HIGH);         //
delay(500);                       //
}                                  //
}

PreviousMillis = millis();
}

void yield() // override the built in yield function
{
  stepper1.run();
  stepper2.run();
}

//---- main loop -----

void loop()                       // In the main loop we must call ciclically the
{                                  // EasyCAT task and our application
                                  //
                                  // This allows the bidirectional exchange of the data
                                  // between the EtherCAT master and our application
                                  //
                                  // The EasyCAT cycle and the Master cycle are asynchronous
                                  //

  Application();                   // user applications

//if (!GlobalManager::initiated && comando != PC_TEENSY_INIT)
}

//---- user application -----

void Application ()               // the received bytes for the outputs
                                  // are transmitted back, simulating the inputs
{
  uint8_t Index;

  Millis = millis();              // As an example for this application
  if (Millis - PreviousMillis >= 10) // we choose a cycle time of 10 mS
  {
    // micro = micros();
    EASYCAT.MainTask(&stepper1); // execute the EasyCAT task
    // micro2 = micros();         //
    // Serial.print("\n MainTask us: "); Serial.println(micro2-micro);
    //delay(1000000000000);
    PreviousMillis = Millis;      //
    for (Index=0; Index < BYTE_NUM; Index++) // BYTE_NUM is a constant declared in
                                              // the library file "EasyCAT.h"
                                              // it defines the number of bytes for the input and for the output
                                              // when the EasyCAT is configured in STANDARD MODE (default setting)
    {
      Serial.print(EASYCAT.BufferOut.Byte[Index]);

```

```
EASYCAT.BufferIn.Byte[BYTE_NUM - 1 - Index] = EASYCAT.BufferOut.Byte[Index] ^ 0xFF; // the data are crossed and complemented
```

```
//EASYCAT.BufferIn.Byte[Index] = EASYCAT.BufferOut.Byte[Index]; // the data are trasmitted back as they are
```

```
    }  
    Serial.println();  
  }  
}
```

**ANEXO 5**  
**CODIGO TEENSY CON TEENSYSTEM**



```
#include "TeensyStep.h"
#include <SPI.h>
#include "HighPowerStepperDriver2.h"
#include "EasyCAT.h"          // EasyCAT library to interface the LAN9252
```

```
#define PIN_SPI_ETHERCAT_CS    10
#define PIN_SPI_ETHERCAT_MOSI  11
#define PIN_SPI_ETHERCAT_MISO  12
#define PIN_SPI_ETHERCAT_CLOCK 13
```

```
const uint8_t DirPin = 2;
const uint8_t StepPin = 3;
const uint8_t CSPin = 4;
const uint8_t DirPin2 = 5;
const uint8_t StepPin2 = 6;
const uint8_t CSPin2 = 7;
const uint8_t DirPin3 = 26;
const uint8_t StepPin3 = 27;
const uint8_t CSPin3 = 28;
const uint8_t DirPin4 = 29;
const uint8_t StepPin4 = 30;
const uint8_t CSPin4 = 31;
```

```
EasyCAT EASYCAT (PIN_SPI_ETHERCAT_CS, ASYNC);
Stepper motor_1(StepPin, DirPin);
Stepper motor_2(StepPin2,DirPin2);
Stepper motor_3(StepPin3,DirPin3);
Stepper motor_4(StepPin4,DirPin4);
```

```
StepControl controller;
StepControl controller2;
StepControl controller3;
StepControl controller4;
```

```
HighPowerStepperDriver M1;
HighPowerStepperDriver M2;
HighPowerStepperDriver M3;
HighPowerStepperDriver M4;
```

```
//--- sanity check to see if the EasyCAT is set in STANDARD MODE -----
```

```
#ifndef CUST_BYTE_NUM_OUT
#error "The EasyCAT must be set in STANDARD MODE !!!"
#endif
```

```
#ifndef CUST_BYTE_NUM_IN
#error "The EasyCAT must be set in STANDARD MODE !!!"
#endif
```

```
//--- global variables -----
```

```
unsigned long Millis = 0;
unsigned long micro,micro2 = 0;
```

```

unsigned long PreviousMillis = 0;
//---- setup -----
void setup()
{
  SPI.begin();
  SPI1.begin();
  Serial.begin(9600);
  M1.setChipSelectPin(CSPin);
  M2.setChipSelectPin(CSPin2);
  M3.setChipSelectPin(CSPin3);
  M4.setChipSelectPin(CSPin4);

  // Drive the STEP and DIR pins low initially.
  pinMode(StepPin, OUTPUT);
  digitalWrite(StepPin, LOW);
  pinMode(DirPin, OUTPUT);
  digitalWrite(DirPin, LOW);

  // Drive the STEP2 and DIR2 pins low initially.
  pinMode(StepPin2, OUTPUT);
  digitalWrite(StepPin2, LOW);
  pinMode(DirPin2, OUTPUT);
  digitalWrite(DirPin2, LOW);

  pinMode(StepPin3, OUTPUT);
  digitalWrite(StepPin3, LOW);
  pinMode(DirPin3, OUTPUT);
  digitalWrite(DirPin3, LOW);

  // Drive the STEP2 and DIR2 pins low initially.
  pinMode(StepPin4, OUTPUT);
  digitalWrite(StepPin4, LOW);
  pinMode(DirPin4, OUTPUT);
  digitalWrite(DirPin4, LOW);

  // Give the driver some time to power up.
  delay(1);

  // Reset the driver to its default settings and clear latched status
  // conditions.
  M1.resetSettings();
  M1.clearStatus();
  M2.resetSettings();
  M2.clearStatus();
  M3.resetSettings();
  M3.clearStatus();
  M4.resetSettings();
  M4.clearStatus();

  // Select auto mixed decay. TI's DRV8711 documentation recommends this mode
  // for most applications, and we find that it usually works well.
  M1.setDecayMode(HPSDDecayMode::AutoMixed);
  M2.setDecayMode(HPSDDecayMode::AutoMixed);

```

```

M3.setDecayMode(HPSDDecayMode::AutoMixed);
M4.setDecayMode(HPSDDecayMode::AutoMixed);
// Set the current limit. You should change the number here to an appropriate
// value for your particular system.
M1.setCurrentMilliamps36v4(1000);
M2.setCurrentMilliamps36v4(1000);
M3.setCurrentMilliamps36v4(1000);
M4.setCurrentMilliamps36v4(1000);
// Set the number of microsteps that correspond to one full step.
M1.setStepMode(HPSDStepMode::MicroStep8);
M2.setStepMode(HPSDStepMode::MicroStep8);
M3.setStepMode(HPSDStepMode::MicroStep8);
M4.setStepMode(HPSDStepMode::MicroStep8);
// Enable the motor outputs.
M1.enableDriver();
M2.enableDriver();
M3.enableDriver();
M4.enableDriver();

// setup the motors
motor_1.setMaxSpeed(20000); // steps/s
motor_1.setAcceleration(30000); // steps/s^2
//
motor_2.setMaxSpeed(20000); // steps/s
motor_2.setAcceleration(30000); // steps/s^2
//
motor_3.setMaxSpeed(20000); // steps/s
motor_3.setAcceleration(25000); // steps/s^2
//
motor_4.setMaxSpeed(25000); // steps/s
motor_4.setAcceleration(30000); // steps/s^2

Serial.print ("\nEasyCAT - Generic EtherCAT slave\n"); // print the banner
delay(50);

//---- initialize the EasyCAT board ----

if (EASYCAT.Init() == true) // initialization
{ // successfully completed
  Serial.print ("initialized"); //
} //

else // initialization failed
{ // the EasyCAT board was not recognized
  Serial.print ("initialization failed"); //
  // The most common reason is that the SPI
  // chip select chosen on the board doesn't
  // match the one chosen by the firmware

  pinMode(13, OUTPUT); // stay in loop for ever
  // with the Arduino led blinking
  while(1) //
  { //
    digitalWrite (13, LOW); //
    delay(500); //
  }
}

```

```

    digitalWrite (13, HIGH);           //
    delay(500);                       //
}                                     //
}

PreviousMillis = millis();

constexpr int spr = 8*200*10; // 200 steps per revolution

motor_1.setTargetAbs(10*spr);
motor_2.setTargetAbs(10*spr);
motor_3.setTargetAbs(1*spr);
motor_4.setTargetAbs(2*spr);
controller.moveAsync(motor_1);
controller.moveAsync(motor_2);
controller.moveAsync(motor_3);
controller.moveAsync(motor_4);
}
void loop()
{

    Application();
    // motor_2.setTargetAbs(10*spr);
    //motor_2.setTargetAbs(10*spr);
    // controller2.rotateAsync(motor_2);

    //controllerr.rotateAsync(motor_1, motor_2); // start synced rotation of both motors
    //
    //delay(5000);
    //
    // move all motors back to their start positions
    // motor_1.setTargetAbs(0);
    // motor_2.setTargetAbs(0);
    //
    // controller.move(motor_2);
    // controller.moveAsync(motor_1);
    //int pos = motor_1.getPosition();
    // if (pos >= 5000)
    // {
    // motor_1.setMaxSpeed(2000); // steps/s
    // motor_1.setAcceleration(10000); // steps/s^2
    // Serial.println("mitad");
    // }
    // motor_1.setMaxSpeed(2000); // steps/s
    // motor_1.setAcceleration(10000); // steps/s^2
    // Serial.println(pos);
    // delay(500);
}
void Application () // the received bytes for the outputs
// are transmitted back, simulating the inputs
{
    uint8_t Index;

    Millis = millis(); // As an example for this application

```

```

if (Millis - PreviousMillis >= 20)          // we choose a cycle time of 10 mS
{
  micro = micros();
  EASYCAT.MainTask();                       // execute the EasyCAT task
  micro2 = micros();                        //
  Serial.print("\n MainTask us: "); Serial.println(micro2-micro);
  //delay(10000000000000);
  PreviousMillis = Millis;                  //
  for (Index=0; Index < BYTE_NUM; Index++)  // BYTE_NUM is a constant declared
                                              // in the library file "EasyCAT.h"
                                              // it defines the number of bytes for the input and for the output
                                              // when the EasyCAT is configured in STANDARD MODE (default setting)
  {
    Serial.print(EASYCAT.BufferOut.Byte[Index]);
    EASYCAT.BufferIn.Byte[BYTE_NUM - 1 - Index] = EASYCAT.BufferOut.Byte[Index] ^ 0xFF;
                                              // the data are crossed and complemented

    //EASYCAT.BufferIn.Byte[Index] = EASYCAT.BufferOut.Byte[Index]; // the data are
                                                                    // trasmitted back as they are
  }
  Serial.println();
}
}
}

```