

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UN ROBOT DE SUBSANACIÓN DE IMPERFECCIONES EN
CHAPA**

JULIO 2019

Sara López Cuesta

Ignacio Álvarez García

[Firma]

[Firma]

AGRADECIMIENTOS

Doy las gracias a mis tutores, Ignacio Álvarez García, como representante del máster, y Rafael Corsino González de los Reyes, como representante de la empresa investigadora en este proyecto, por su colaboración y apoyo durante todo el proceso.

A los profesores del Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica, en especial al Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, por su disponibilidad, cooperación y concesión de recursos materiales.

A la empresa DSI Plus S.L., colaboradora en la investigación, por facilitarme medios, tanto maquinaria como conocimientos, para llevar a cabo mis objetivos.

A mis seres queridos, por su apoyo y ánimos durante toda la evolución del proyecto.

RESUMEN

El objetivo del proyecto es el desarrollo de un robot para la reparación de imperfecciones en chapa gruesa. Este proyecto se lleva a cabo en la Universidad de Oviedo, en colaboración con Daorje S.L.U.

En este documento se describe el desarrollo de un sistema de saneo de defectos en la superficie de una chapa de acero, englobado en un proyecto de mayor complejidad descrito a continuación. En un alto porcentaje de las planchas sometidas a un proceso de laminación en la empresa antes mencionada, se presentan una serie de fallos que hasta el momento eran tratados por un operario con una herramienta manual. Con este trabajo se pretende demostrar que es posible llevar a cabo un robot que realice de forma independiente las tareas de mayores dimensiones o dificultad y facilite las labores a dicho operario, disminuyendo los riesgos para la salud a los que se está sometido constantemente en este tipo de trabajos. La finalidad es desarrollar un robot autónomo que se desplace por el entorno industrial, identificando la posición de la chapa a sanear y una vez sobre esta, identifique la situación, dimensión y tipo de los defectos. Una vez localizado un defecto se ha de corregir con la herramienta adecuada. El proyecto se divide en cuatro subtareas principales: localización de la chapa, localización e identificación de defectos, movimiento del robot y sistema de saneo.

A partir de un diseño general del robot final, formado por una serie de elementos comerciales seleccionados por la empresa financiadora del proyecto, antes mencionada, se desarrolla un prototipo a pequeña escala para llevar a cabo y probar en un entorno controlado los algoritmos necesarios para el proceso de saneo, que luego se utilizarán con el robot real.

En el primer apartado del documento se hace una breve introducción a los procesos de conformado y saneado de chapa, así como de las dificultades y riesgos que implican los mismos para los operarios. Se hace un breve repaso del estado del arte de los robots de mecanizado existentes en el mercado y se explican las ventajas de este proyecto frente a otros.

En los apartados restantes se resume la solución implementada en base a los requerimientos e información facilitados por la empresa financiadora del proyecto.

PALABRAS CLAVE

Saneo - Amoladora - Chapa - Prototipo - Dremel - Guía lineal - Raspberry - Cilindro

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE LA MEMORIA.....	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XI
MEMORIA	XIII

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESPECIFICACIONES	1
1.1.	CONTEXTO DEL PROYECTO	1
1.2.	EL PROCESO DE LAMINACIÓN.....	2
1.3.	DEFECTOS DURANTE LA LAMINACIÓN	4
1.4.	EL PROCESO DE AMOLADO EN LA REPARACIÓN DE DEFECTOS.....	6
1.4.1.	<i>Fuerza y velocidad de la herramienta.....</i>	<i>6</i>
1.4.2.	<i>Tipos de agentes abrasivos de la herramienta.....</i>	<i>8</i>
1.4.3.	<i>Tipos de herramientas de amolado</i>	<i>9</i>
1.4.4.	<i>Aplicaciones principales del amolado.....</i>	<i>11</i>
1.4.5.	<i>riesgos para la salud del trabajador y productividad.....</i>	<i>14</i>
1.5.	ESTADO DEL ARTE DE ROBOTS DE MECANIZADO.....	15
1.6.	VENTAJAS DE ESTE PROYECTO FRENTE A OTROS.....	16
1.7.	RESUMEN DEL MÉTODO	17
1.8.	FLUJOGRAMA.....	18
2.	SOLUCIÓN PROPUESTA.....	19
2.1.	MODELOS PROPUESTOS.....	21
2.1.1.	<i>Brazo robótico comercial.....</i>	<i>21</i>
2.1.2.	<i>Diseños particulares</i>	<i>23</i>
2.2.	PROTOTIPO: HERRAMIENTA	25
2.2.1.	<i>Herramienta elegida y características principales</i>	<i>26</i>
2.3.	PROTOTIPO: CILINDRO ELÉCTRICO	28
2.3.1.	<i>Cilindro elegido y características principales</i>	<i>29</i>
2.3.2.	<i>PLC</i>	<i>37</i>
2.4.	PROTOTIPO: GUÍA LINEAL	39
2.4.1.	<i>Guía.....</i>	<i>39</i>
2.4.2.	<i>Accionamiento.....</i>	<i>41</i>
2.4.3.	<i>Control</i>	<i>44</i>
2.5.	PROTOTIPO: ORDENADOR CENTRAL	46
2.5.1.	<i>Raspberry Pi 3 B+</i>	<i>49</i>
2.6.	PROTOTIPO: CIRCUITOS EXTRA	50
2.6.1.	<i>Conexión/Desconexión de la herramienta</i>	<i>50</i>
2.6.2.	<i>Señal al PLC</i>	<i>52</i>
2.7.	PROTOTIPO: ALIMENTACIÓN.	55
3.	MONTAJE FINAL DEL PROTOTIPO.....	57
3.1.	MONTAJE FÍSICO	58
4.	EXPERIMENTOS Y RESULTADOS.....	61
5.	DISCUSIÓN.....	63
6.	CONCLUSIONES	65
7.	PRESUPUESTO	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXOS.....	73
	ANEXO I.....	75

ANEXO II.....	81
ANEXO III.....	83
ANEXO IV	89

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Entorno industrial generado para las pruebas, vista general.</i>	1
<i>Figura 1.2. Entorno industrial generado para las pruebas, vista de las chapas.</i>	2
<i>Figura 1.3. Ejemplo de proceso de laminación: una chapa que reduce su espesor al pasar a través de dos cilindros.</i>	3
<i>Figura 1.4. Tipos de laminación.</i>	3
<i>Figura 1.5. Ejemplo de marcas de abultamientos.</i>	4
<i>Figura 1.6. Ejemplo de piel de cocodrilo.</i>	5
<i>Figura 1.7. Grieta de desbaste antes (extremos) y después (parte central) del amolado.</i>	5
<i>Figura 1.8. Ejemplo de amoladora manual [6].</i>	6
<i>Figura 1.9. Postura inapropiada de trabajo manual de amolado.</i>	7
<i>Figura 1.10. Gráfica de par frente a velocidad en una amoladora con regulador de presión.</i>	7
<i>Figura 1.11. Medida del tamaño de grano del disco de abrasivo.</i>	9
<i>Figura 1.12. Ejemplo de amoladora vertical [8].</i>	10
<i>Figura 1.13. Ejemplo de amoladora angular.</i>	10
<i>Figura 1.14. Ejemplo de amoladora recta.</i>	10
<i>Figura 1.15. Puntas para amoladora de precisión. A la izquierda de acero rápido, a la derecha de material abrasivo.</i>	12
<i>Figura 1.16. Sistema de sujeción de la punta de abrasivo.</i>	12
<i>Figura 1.17. Sistema de sujeción de la muela.</i>	13
<i>Figura 1.18. Ejemplo de movimiento orbital.</i>	13
<i>Figura 1.19. Flap-wheel. [11].</i>	14
<i>Figura 1.20. Ejemplo de prototipo industrial de robot de amolado.</i>	16
<i>Figura 1.21. Ejemplo de robot de amolado de 3 ejes coordinados.</i>	17
<i>Figura 2.1. Active Angular Kit 201.</i>	19
<i>Figura 2.2. AAK 601.</i>	20
<i>Figura 2.3. Bases de Robotnik con las alternativas de brazos.</i>	21
<i>Figura 2.4. Sistema propuesto.</i>	24
<i>Figura 2.5. Modelo robot definitivo, diseñado por la empresa.</i>	24
<i>Figura 2.6. Elementos que conforman la Dremel 8220.</i>	27
<i>Figura 2.7. Elementos que conforman el LEYG25MB-100.</i>	29
<i>Figura 2.8. Carga máxima en función de la carrera.</i>	31
<i>Figura 2.9. Velocidad máxima en función de la carga.</i>	31
<i>Figura 2.10. Equivalencia en Newtons del valor de porcentaje de fuerza en la operación de empuje.</i>	32
<i>Figura 2.11. Elementos que conforman el LECP6P1.</i>	34
<i>Figura 2.12. Señales del controlador para el manejo del cilindro y correspondiente código de cableado (Ax/Bx).</i>	35
<i>Figura 2.13. Ejemplo de ciclo.</i>	36
<i>Figura 2.14. Descripción gráfica de la operación de fuerza.</i>	37
<i>Figura 2.15. Error en operación de fuerza.</i>	37
<i>Figura 2.16. Elementos que conforman el CP1E-N30DR-D.</i>	38
<i>Figura 2.17. Elementos que conforman la drylin SHT-20-AWM.</i>	40
<i>Figura 2.18. Datos del husillo: TR corresponde al diámetro externo, m al paso y L a la longitud total.</i>	40
<i>Figura 2.19. Velocidad de avance del carro máxima en m/min en función de la carga.</i>	40
<i>Figura 2.20. Velocidad de rotación máxima en rpm en función de la carga.</i>	41
<i>Figura 2.21. Conexiones del controlador del motor.</i>	42
<i>Figura 2.22. Curvas par-velocidad del motor, con el controlador alimentado a 24 VDC, 2.8 A y una división de 256 micropasos.</i>	43
<i>Figura 2.23. Pines GPIO de la Raspberry 3 B+.</i>	49

<i>Figura 2.24. Circuito interno Dremel.</i>	50
<i>Figura 2.25. Circuito para el relé.</i>	51
<i>Figura 2.26. Ejemplo de conexión del circuito del relé.</i>	52
<i>Figura 2.27. Pines del HCPL-3120.</i>	53
<i>Figura 2.28. Circuito para el optoacoplador.</i>	53
<i>Figura 2.29. Parte inferior de la PCB.</i>	54
<i>Figura 2.30. Parte superior de la PCB.</i>	54
<i>Figura 3.1. Diseño en 3D con el software SolidWorks del prototipo.</i>	58
<i>Figura 3.2. Vista frontal del montaje del cilindro y la herramienta.</i>	59
<i>Figura 3.3. Vista lateral del montaje del cilindro y la herramienta.</i>	59
<i>Figura 3.4. Montaje de la electrónica.</i>	60
<i>Figura 3.5. Prototipo completo.</i>	60
<i>Figura 4.1. Antes del mecanizado.</i>	62
<i>Figura 4.2. Tras el mecanizado.</i>	62

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Velocidades máximas según el código de seguridad FEPA y ANSI [9].</i>	11
<i>Tabla 1.2. Procesos industriales en los que se utilizan robots.</i>	15
<i>Tabla 2.1. Características del AAK 201.</i>	19
<i>Tabla 2.2. Características del AAK 601.</i>	20
<i>Tabla 2.3. Robots con capacidad de carga de al menos 8.5 kg.</i>	22
<i>Tabla 2.4. Robots con capacidad de carga de al menos 20 kg.</i>	23
<i>Tabla 2.5. Comparativa de posibles herramientas para el prototipo.</i>	26
<i>Tabla 2.6. Propiedades de la Dremel 8220.</i>	27
<i>Tabla 2.7. Rango de velocidades de la Dremel 8220.</i>	27
<i>Tabla 2.8. Lista de componentes de la Dremel 8220.</i>	28
<i>Tabla 2.9. Lista de componentes del LEYG25MB-100.</i>	30
<i>Tabla 2.10. Características técnicas básicas del cilindro.</i>	30
<i>Tabla 2.11. Características completas del cilindro.</i>	33
<i>Tabla 2.12. Lista de componentes del LECP6P1.</i>	34
<i>Tabla 2.13. Ejemplo de combinación de entradas para seleccionar una posición de memoria.</i>	35
<i>Tabla 2.14. Relación entre salidas/entradas del controlador del cilindro y de PLC.</i>	38
<i>Tabla 2.15. Datos técnicos de la guía lineal.</i>	39
<i>Tabla 2.16. Datos técnicos del motor.</i>	41
<i>Tabla 2.17. Valores de operación que puede alcanzar el PD57-2-1161.</i>	42
<i>Tabla 2.18. Parámetros del PD57-2-1161.</i>	43
<i>Tabla 2.19. Array de bytes de un comando para enviar al motor.</i>	45
<i>Tabla 2.20. Array de bytes de un comando recibido del motor.</i>	45
<i>Tabla 2.21. Códigos de estatus del motor.</i>	45
<i>Tabla 2.22. Comparativa SBC más utilizadas.</i>	48
<i>Tabla 2.23. Condiciones de operación recomendadas.</i>	52
<i>Tabla 2.24. Tabla de consumos de potencia.</i>	55
<i>Tabla 3.1. Valores mínimos de diseño para piezas impresas en 3D.</i>	57
<i>Tabla 3.2. Perfiles de aluminio que conforman el prototipo.</i>	58
<i>Tabla 4.1. Distancias de ensayos.</i>	62

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESPECIFICACIONES

1.1. Contexto del proyecto

Este proyecto se lleva a cabo en la Universidad de Oviedo, en colaboración con Daorje S.L.U., “la empresa” de aquí en adelante.

Durante el proceso de laminación de chapa se pueden producir una serie de imperfecciones sobre la superficie de esta que la invalidan para su uso posterior. Hoy en día hay muchos campos en los que se utiliza chapa laminada, principalmente en la construcción de estructuras de acero, como barcos o puentes. Tras la fabricación de una chapa es necesario inspeccionarla; se desconoce el porcentaje de defectuosas durante la producción, ya que es un proceso con muchos factores determinantes. Pero para que las chapas puedan cumplir con las restricciones de tolerancias impuestas por la empresa, o el cliente que las utilizará en sus productos, y a fin de no encarecer excesivamente los procesos de producción, ya sea por la retirada de las planchas de la serie o el cambio de los elementos de la máquina que generan los defectos, es necesario corregir estos a la salida del tren de laminación y antes del lacado o pintado de las chapas. Esto lo lleva a cabo un operario con una herramienta eléctrica manual, estando sometido a diversas situaciones de peligro para su salud que conlleva el trabajo de mecanizado de metales y el uso de herramientas de altas frecuencias, descritas en el apartado 1.4.5.

La finalidad del proyecto es desarrollar un robot para la reparación de las imperfecciones de la chapa, que realice de forma independiente las tareas de mayores dimensiones o dificultad y facilite las labores al operario, disminuyendo los riesgos para la salud a los que se está sometido. Se trata de desarrollar un robot autónomo que se desplace por el entorno industrial, identificando la posición de la chapa a sanear y una vez sobre esta, identifique la situación, dimensión y tipo de los defectos. Una vez localizado un defecto se ha de corregir con la herramienta adecuada. El proyecto global se divide en cuatro subtareas principales: localización de la chapa, localización e identificación de defectos, movimiento del robot, sistema de saneo.

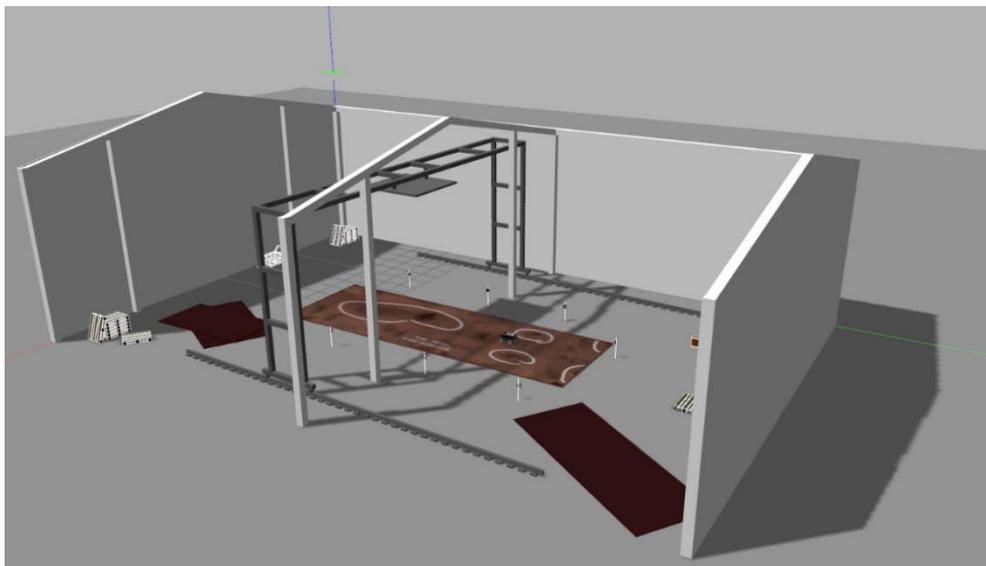


Figura 1.1. Entorno industrial generado para las pruebas, vista general.

Los apartados de localización de la chapa e identificación de defectos han sido llevados a cabo por alumnos del Máster de Automatización Informática de la Universidad de Oviedo. Estas dos funcionalidades han sido probadas en un entorno de simulación de Linux, Gazebo, utilizando paquetes de ROS (Robot Operating System), un framework para el desarrollo de software de robótica. Para ello se ha modelado en el software de diseño CAD *Solidworks* una fábrica virtual con diferentes elementos con los que poder probar los obstáculos a identificar durante la navegación autónoma del robot. Los experimentos y resultados se pueden leer en los documentos [1] y [2] de la bibliografía.



Figura 1.2. Entorno industrial generado para las pruebas, vista de las chapas.

La tarea de subsanación de la chapa es lo que atañe a este documento y en él se describe el diseño e implementación de un prototipo a pequeña escala de este, en base a las exigencias y condiciones impuestas por la empresa.

La ventaja de este proyecto reside en la autonomía del robot, que permitirá: que los operarios puedan realizar otras tareas simultáneamente fuera o dentro de la chapa, manteniendo unas condiciones de seguridad en todo momento, lo que agilizará los procesos; la versatilidad de poder posicionar la chapa en cualquier punto de la fábrica, lo que implica la ausencia de necesidad de facilitar una estancia específica para posicionar el robot y tener que construir un sistema de acercamiento de la lámina al elemento de saneo. Además, permite un mayor control sobre el proceso de saneo ya que se elimina por completo el factor humano y se pueden ajustar tanto las fuerzas de presión sobre la chapa, como el área recorrida, etc.

1.2. El proceso de laminación

La laminación es un proceso industrial que se lleva a cabo en una acería, consistente en la transformación de perfiles, previamente obtenidos mediante colada continua, reduciendo su espesor o modificando su sección transversal. Para conseguir esto se aplican altas fuerzas de compresión al perfil mientras este atraviesa un conjunto de rodillos. Se puede emplear el proceso de laminación al 90% de los metales y aleaciones y a diversos materiales no metálicos, como por ejemplo plásticos o vidrio [3].

En una primera fase se realiza una laminación en caliente a fin de modificar la estructura del material y conseguir mejores propiedades de resistencia y dureza. En una segunda etapa se realiza una laminación en frío para que el material adquiriera más resistencia y un mejor acabado superficial.

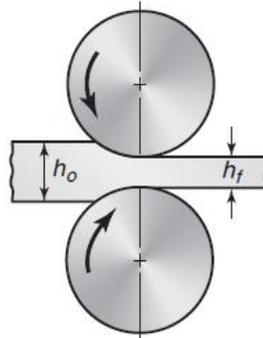


Figura 1.3. Ejemplo de proceso de laminación: una chapa que reduce su espesor al pasar a través de dos cilindros.

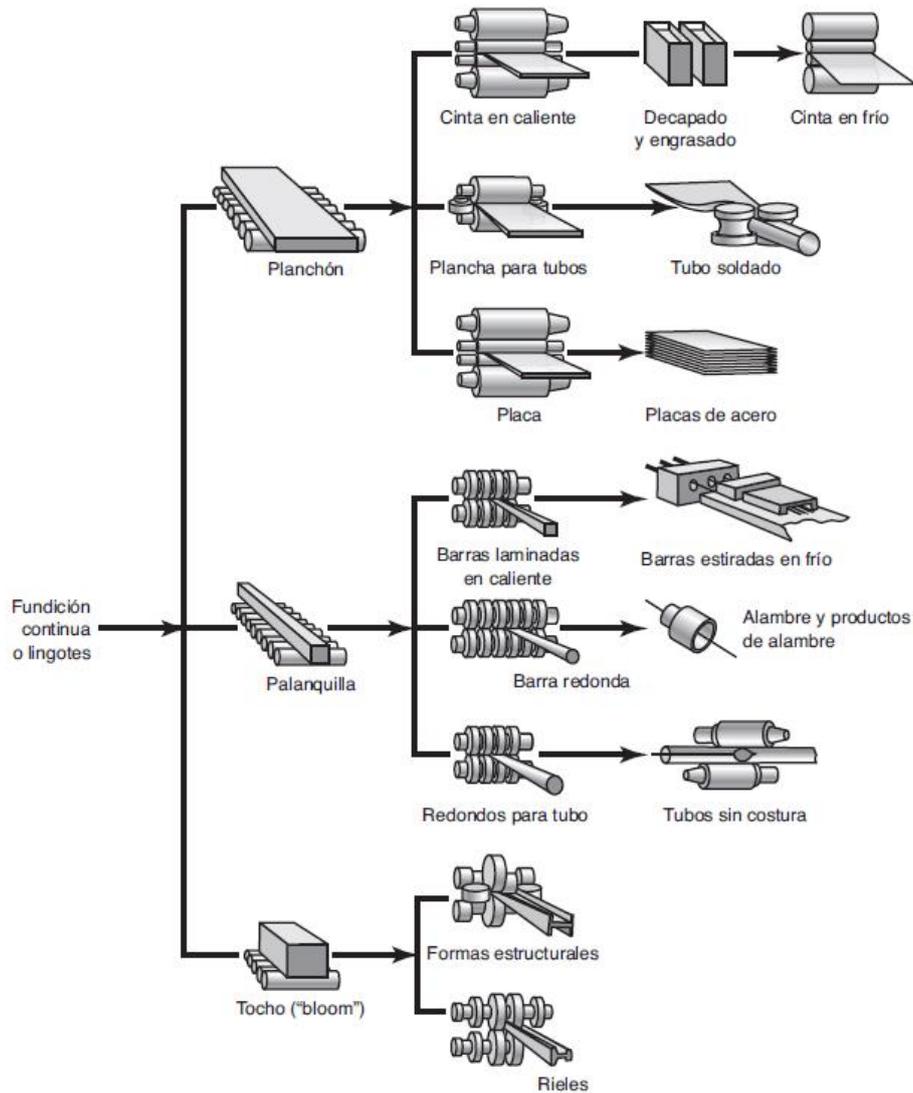


Figura 1.4. Tipos de laminación.

Posteriormente se lleva a cabo un tratamiento térmico en un horno, conocido como normalizado [4], con el que se pretende eliminar las posibles tensiones internas del material surgidas durante el proceso de compresión y conseguir una estructura interna del acero más uniforme, aumentando la tenacidad.

Hay muchos procesos de laminación, como se puede ver en la Figura 1.4, aunque el que atañe principalmente a este documento es el de laminación de placas de acero. Las placas suelen utilizarse en la fabricación de elementos estructurales, principalmente cascos de barcos, tanques, recipientes de reactores, puentes, etc. Los espesores suelen variar entre 6 y 300 milímetros (mm).

1.3. Defectos durante la laminación

Durante el proceso de laminación se pueden dar una serie de factores que estropeen el acabado superficial de las placas, por lo que estas han de ser supervisadas y reparadas posteriormente para poder ser enviadas a los clientes de la acería.

Varios ejemplos de defectos encontrados en chapas de la empresa y sus respectivas formas de tratarlos son los siguientes [5]:

- **Abultamientos:** aparecen a causa de una falta de material en los rodillos del proceso de laminación, generalmente a causa de desconches o elementos externos que hayan dañado el cilindro. Como consecuencia esta oquedad se marcará en la placa y dejará un abultamiento. Para sanearlos hay que realizar un proceso de amolado en la zona, quitando el espesor puntual. Lo más habitual es que no sea un defecto único y que se origine una marca longitudinal y continua en toda la chapa.
- **Oquedades:** aparecen a causa de una incrustación de material en los rodillos del proceso de laminación, a causa de suciedad, viruta metálica, etc. Estos se adhieren al rodillo y se quedan marcados en la superficie de la placa. Si la oquedad resultante en la placa está por debajo de las tolerancias (marcadas por el espesor total de la chapa), se procede a sanear la zona con soldadura y posteriormente amolar el exceso de material tras la soldadura.



Figura 1.5. Ejemplo de marcas de abultamientos.

- **Piel de cocodrilo:** son marcas muy características que se generan en la superficie de la chapa, de un aspecto similar a la piel de un cocodrilo. Aparentemente parecen pequeñas grietas, pero realmente consisten en un pequeño exceso de material. Son muy similares a los abultamientos,

aunque en mayores superficies, y se tratan de la misma forma. Ocurren porque el perfil está más tiempo de lo habitual entre los cilindros de trabajo y en estos se generan unas grietas térmicas.



Figura 1.6. Ejemplo de piel de cocodrilo.

- Picaduras: son defectos producidos por acumulaciones de restos metálicos puntuales, originados por las diferencias de velocidad de los diferentes elementos de transporte tras el normalizado, o antes de este por adhesión al desmantar y dejar la chapa con una grúa en el camino de rodillos que la desplaza dentro del horno. Dentro del horno los restos se aglutinan y se compactan sobre la chapa. Se elimina fácilmente mediante amolado.

- Marca de desbaste: grieta superficial que aparece longitudinalmente en la chapa a causa de problemas en los moldes de la acería, al moldear el perfil inicial. La grieta originalmente tiene una profundidad generalmente inferior a 1 mm (comprobado experimentalmente por líquidos penetrantes), y durante la laminación la profundidad disminuye, por lo que el saneo se realiza mediante un amolado de una profundidad de unos 0,2 mm.



Figura 1.7. Grieta de desbaste antes (extremos) y después (parte central) del amolado.

1.4. El proceso de amolado en la reparación de defectos

Hay tres tipos principales de procesos de amolado (también conocido como rectificando): de precisión o troquelado; de desbaste y corte; de rectificando superficial (lijado y pulido). Para cada aplicación se requieren herramientas y técnicas diferentes. En todo proceso industrial es fundamental tener en cuenta la productividad durante el proceso, y hay que considerar los costes asociados tanto a la herramienta de trabajo y los repuestos, como la mano de obra. Esto implica identificar correctamente qué tarea se quiere llevar a cabo y con qué material se va a trabajar, para seleccionar el instrumento más adecuado a las necesidades específicas del proyecto, así como la eficiencia, confort del operario y seguridad. Los aspectos principales de esto último son: peso y dimensiones de los útiles, agarre y postura y técnica de trabajo.

El fundamento básico de las herramientas de amolar es una máquina rotativa, generalmente alimentada con elementos neumáticos, de pequeñas dimensiones, para poder ser manejada por un operario, con un elemento de granos de abrasivo en su extremo, unidos en formas variadas, como discos o puntas. Los tipos de abrasivo y formas de unión se explican extensamente más adelante.



Figura 1.8. Ejemplo de amoladora manual [6].

El término amolado es una descripción genérica que engloba diferentes procesos de acabado superficial utilizando herramientas con abrasivos. Es muy similar a otros procesos de mecanizado, como lijado o pulido, y no hay una clara diferencia entre todos ellos.

1.4.1. FUERZA Y VELOCIDAD DE LA HERRAMIENTA

Hay muchas formas de llevar a cabo un proceso de amolado. La presión que ha de ejercer la herramienta ha de ser elevada para garantizar un trabajo rápido, ya que por lo general es un trabajo tedioso para un operario por generar ruidos y conllevar posiciones incómodas, que provocan problemas musculares y óseos. Por eso en muchas ocasiones son los mismos operarios los que, por tratar de realizar el trabajo con mayor fuerza, utilizan la herramienta de forma incorrecta, ejerciendo demasiada presión sobre la misma. Esto es ineficiente, tanto para la propia salud del usuario como para el útil de trabajo, ya que un exceso de carga disminuye la vida útil de este [7].



Figura 1.9. Postura inapropiada de trabajo manual de amolado.

La potencia se puede describir como el producto de fuerza por velocidad, o par por velocidad angular en el caso de herramientas rotativas. Cuando la herramienta entra en contacto con la superficie a amolar, disminuye la velocidad de este al generarse un par de reacción muy elevado en sentido contrario al de actuación de la herramienta. También se produce una gran pérdida de energía y mayor desgaste del elemento abrasivo. Por tanto, cuanto más fuerza ejerza el operario, peores condiciones para el proceso, puesto que la pérdida de velocidad produce que el mecanizado sea más lento e ineficiente.

Sin embargo, existen herramientas neumáticas equipadas con un regulador de presión, que permite limitar el flujo de aire a través del motor cuando no se aplica par. En el momento en el que se empieza a mecanizar y a aplicar par, la velocidad de rotación disminuye y el regulador permite un paso de aire mayor y continuo a través del circuito neumático, permitiendo mantener altas velocidades. Por lo general, una herramienta sin regulador alcanza el máximo de potencia al 50% de velocidad, mientras que una con dicho elemento el punto óptimo de funcionamiento se encuentra en torno al 75-90% de la velocidad máxima de la herramienta.

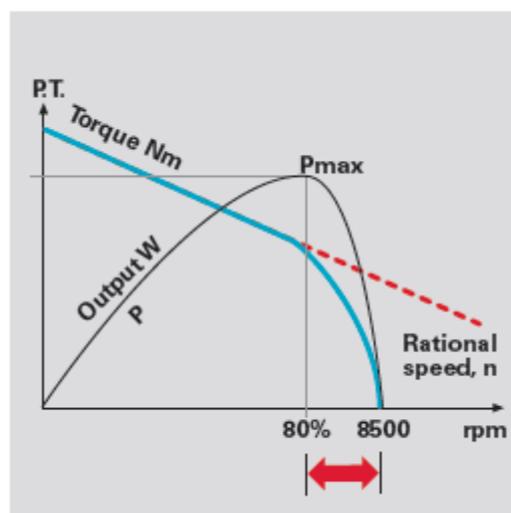


Figura 1.10. Gráfica de par frente a velocidad en una amoladora con regulador de presión.

Otra forma de aumentar el par puede ser mediante el uso de sistemas de engranajes, para aumentar el par desde la salida del motor hasta la punta de la herramienta.

No obstante, el punto óptimo de funcionamiento no equivale al punto óptimo de retirada de material. Durante el amolado se produce un arranque de material en conjunto con una generación de calor. Hay que tener esto último en cuenta, de forma que el punto óptimo del proceso en sí es aquel en el que la fuerza aplicada genera mayor retirada de material y menor calor simultáneamente.

La velocidad de rotación de la herramienta es relevante no solo para el arranque de material en sí (a mayor velocidad mayor número de granos de abrasivo por unidad de tiempo en contacto con la pieza), sino también para la vida útil de los discos de abrasivo y la seguridad del usuario. Estos están diseñados para soportar unas velocidades específicas sin llegar a dañar su material, lo que podría llegar a generar desprendimientos y por tanto proyección de partículas hacia el operario. Los límites vienen indicados en cada disco y diferencian dos velocidades diferentes: la velocidad de rotación (v_r), medida en revoluciones por minuto (rpm), es decir la que la propia máquina induce al disco; y la velocidad periférica (v_p), medida en m/s^2 , resultado del producto del diámetro del disco (d), con su valor en metros, y la velocidad de rotación.

$$v_p = v_r * d * \frac{\pi}{60} \quad (1.1)$$

Las velocidades máximas de las herramientas están reguladas por unos códigos de seguridad, descritos por la Federación Europea de Productos Abrasivos (FEPA) y el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI). En el apartado 1.4.3 se puede ver una tabla con estas velocidades.

1.4.2. TIPOS DE AGENTES ABRASIVOS DE LA HERRAMIENTA

Hay muchos tipos de materiales abrasivos diferentes, pero los más utilizados para los procesos de amolado son abrasivos aglutinados y abrasivos recubiertos. Esta terminología hace referencia a cómo las partículas abrasivas están unidas al conjunto. Los abrasivos recubiertos tienen los diferentes granos de abrasivo adheridos a una cinta, disco u hoja de trabajo, es decir, a un elemento externo y generalmente del espesor de una lámina, que más tarde se adherirá a un soporte para unirlos a la herramienta; mientras que los abrasivos aglutinados tienen los granos unidos entre sí en una resina o agente de unión para formar una rueda o piedra.

En los abrasivos recubiertos, el abrasivo consiste en pequeñas partículas, generalmente de óxido de aluminio (Al_2O_3) o carburo de silicio (SiC). Los granos están unidos entre sí mediante un material de soporte y un material de unión. Los materiales de soporte pueden ser muy diversos, como papel, fibra o tela. El agente de unión es pegamento. Este puede ser pegamento fenólico, que es más resistente y duradero, y remueve el material de forma más eficiente, aunque es más agresivo que el pegamento estándar.

Los aglutinados son una mezcla de granos abrasivos, relleno y materiales de unión. El agente de unión suele ser resina fenólica o cerámica (ruedas vítreas). En la industria, se siguen realizando investigaciones utilizando nuevos tipos de granos abrasivos y materiales de unión diferentes para aumentar el rendimiento del producto abrasivo adherido. Cada producto está diseñado para dar un acabado específico, velocidad de corte y requisitos de corte. El resultado de este aglutinamiento

es un disco poroso de densidad variable, aunque es posible reforzarlos reforzar con algún recubrimiento de fibra.

La dureza de unión (concentración de aglutinante) y tamaño del grano de abrasivo depende únicamente de la tarea y el acabado superficial que se quiera llevar a cabo. Los granos más pequeños generan superficies más suaves y se suelen utilizar en acabados superficiales finos, redondeado de aristas, piezas pequeñas y/o piezas frágiles. Por otro lado, los granos de mayor tamaño se utilizan en piezas en las que es necesario retirar grandes cantidades de material, en piezas fabricadas con un material muy duro o piezas de grandes dimensiones. Dependiendo del proceso, se pueden combinar ambos tipos de disco, realizando un desbaste general con grano grueso previamente y aplicando un acabado superficial fino con grano pequeño después.

El tamaño de grano sigue un estándar internacional ISO 525. Este se define en función de si el grano es capaz de atravesar o no una fina malla de ciertas dimensiones. La unidad de medida se define como mallas por pulgada. y divide los granos en:

- Grueso 8 -24 mallas
- Medio 30 – 60 mallas
- Fino 80 – 180 mallas
- Muy fino 220 – 400 mallas

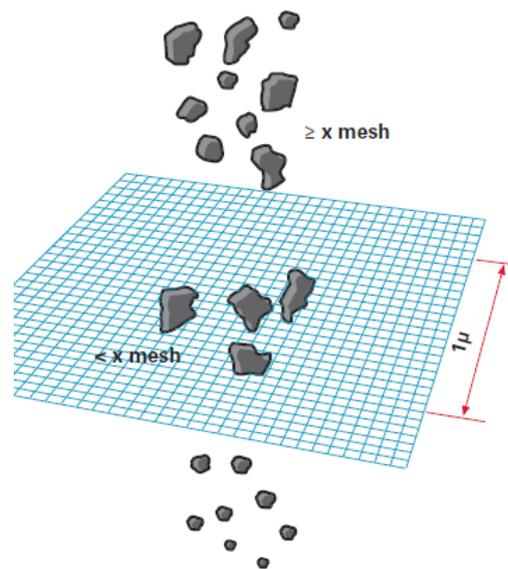


Figura 1.11. Medida del tamaño de grano del disco de abrasivo.

Por su parte, la fuerza de la unión se indica con una letra mayúscula, no obstante, cada letra está definida por el fabricante, por lo que dos referencias iguales entre amoladoras de fabricantes diferentes siempre indicarán el mismo tamaño de grano, pero la dureza de este podrá ser distinta.

En resumen, la aplicación a llevar a cabo es lo que determina el tipo y tamaño de grano de abrasivo, y este a su vez limita las velocidades máximas que se pueden aplicar, condicionando el tipo de herramienta a utilizar, remarcando el hecho de que para cada aplicación se requiere una herramienta específica.

1.4.3. TIPOS DE HERRAMIENTAS DE AMOLADO

Hay tres tipos principales de herramientas:

- Amoladoras verticales: de gran tamaño y de elevada potencia, adecuadas para la eliminación de grandes cantidades de material con facilidad de acceso a la zona a mecanizar. En las amoladoras verticales el eje del motor y el husillo saliente están alineados.



Figura 1.12. Ejemplo de amoladora vertical [8].

- Amoladoras angulares: los ejes del motor de la herramienta y de salida se encuentran en un ángulo de 90° gracias a una serie de engranajes. Las amoladoras angulares son más adecuadas en espacios reducidos.



Figura 1.13. Ejemplo de amoladora angular.

- Amoladoras rectas: el eje de salida está alineado con el eje del motor, al igual que en las amoladoras verticales, pero en este caso la herramienta es más alargada y más delgada, por lo que puede entrar en espacios estrechos o cavidades.



Figura 1.14. Ejemplo de amoladora recta.

	FEPA	ANSI
Centro hundido, discos rectos y discos de corte 180 mm; 8,500 rpm 230 mm; 6,600 rpm	80 m/s 7"; 7,750 rpm 9"; 6,000 rpm	72 m/s
Muestras de copa y rectas	50 m/s	48 m/s (discos de alta resistencia)
Muestras cónicas	50 m/s	48 m/s (discos de alta resistencia)
Muestras vitrificadas	35 m/s	33 m/s (discos de alta resistencia)

Tabla 1.1. Velocidades máximas según el código de seguridad FEPA y ANSI [9].

Además de la forma, las amoladoras se clasifican en función de su sistema de alimentación: herramientas eléctricas o herramientas neumáticas. Dentro de las eléctricas se diferencian entre frecuencia estándar y alta frecuencia [10]. Las amoladoras eléctricas tienen menos costes tanto en energía, inversión inicial como en mantenimiento; menor desgaste en los discos y una mayor eficiencia en el desbaste. Esto se debe a que la potencia efectiva es mayor que en las amoladoras estándar de aire comprimido, y a mayor potencia mayor velocidad y por tanto mayor tasa de arranque de material. Además, se alimentan con electricidad, eliminando los equipos de compresión para el aire, que pueden resultar molestos en un entorno industrial

No obstante, las herramientas eléctricas son más pesadas que las neumáticas, y eso afecta a la eficiencia del operario y a su seguridad.

1.4.4. APLICACIONES PRINCIPALES DEL AMOLADO

La gran mayoría de productos manufacturados requieren procesos de acabado superficial después de su fabricación, ya sea para conseguir tolerancias requeridas, reparar defectos o por un mero hecho estético.

Como se ha mencionado al principio del apartado 1.4, hay tres tipos principales de procesos de amolado: de precisión o troquelado; de desbaste y corte; de rectificado superficial (lijado y pulido).

El amolado de precisión tiene como objetivo la eliminación de material en áreas pequeñas, cavidades o en espacios de reducidas dimensiones. La creación de cavidades en una matriz y la eliminación de material sobrante tras una soldadura estrecha son ejemplos de aplicación de amolado de precisión. Otras operaciones podrían ser el desbarbado (retirada de rebabas), el corte de piezas de cualquier material, el biselado o el mecanizado de ranuras.

Para este proceso se utilizan herramientas de alta velocidad, sin engranajes y generalmente con un mandril de sujeción para el material abrasivo en punta. Suelen ser pequeñas, de poca potencia y en su mayoría se utilizan amoladoras rectas, aunque depende de la zona a la que se tenga que acceder.

El material abrasivo utilizado más habitual son pequeñas puntas unidas a un mandril. Hay dos tipos: unas son de carburo de tungsteno o aceros rápidos, a las que se da forma en una sola pieza alrededor de una varilla de metal que hace de mango; las otras están hechas con abrasivo aglutinado estándar. Las primeras tienen "dientes" mecanizados sobre la punta, cuyo tamaño puede

variar en gran medida dependiendo de la aplicación, al igual que varía el diámetro de los granos de abrasivo.

El sistema de sujeción es mediante un mandril unido a la herramienta, que se puede apretar y aflojar con una pequeña llave inglesa para poder utilizar puntas de diferentes tamaños.



Figura 1.15. Puntas para amoladora de precisión. A la izquierda de acero rápido, a la derecha de material abrasivo.

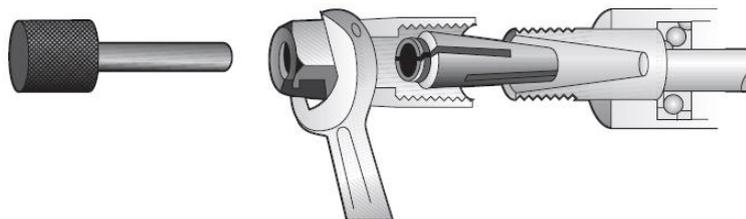


Figura 1.16. Sistema de sujeción de la punta de abrasivo.

El principio de arranque de material de este tipo de amolado se puede resumir en que cada vez que un diente de la punta o un grano abrasivo toca la pieza de trabajo, se corta una pequeña porción de esta, obteniéndose una viruta, al igual que ocurre en procesos como el fresado. Es importante que no se aplique demasiada fuerza para evitar que la herramienta se bloquee.

El área de contacto herramienta-pieza ha de ser lo más pequeña posible para tener un mayor control sobre la herramienta y para poder aumentar la presión de contacto, pues esto último a su vez se traduce en una mayor tasa de eliminación de material.

Otro de los tipos de amolado es el amolado de desbaste. Su objetivo es eliminar la mayor cantidad de material posible, de forma que los acabados superficiales pasan a un segundo plano. Es común utilizar este tipo de mecanizado en procesos como retirada de material sobrante tras una soldadura, una forja o una fundición; también se puede utilizar para realizar nivelaciones de piezas, suavizado de aristas, aumentar el tamaño de cavidades o simplemente cortar piezas.

No hay un tipo de amoladora específica utilizada, pero si un tipo de abrasivo. Los más común es emplear muelas (discos de amolado). Hay muchos tipos de muelas, divididas en seis grupos básicos: discos con el centro hundido en la cara de fricción con la pieza, para que haya un contacto al ras de la cara de la rueda sin que el sistema de sujeción interfiera; discos de corte, son planos ya que no se utilizan por la cara del disco, sino por el borde, y por lo general más finos que los de centro hundido; discos rectos y de copa, utilizados para eliminar material en superficies abiertas;

discos cónicos y puntas de abrasivo, estas últimas iguales que en el amolado de precisión, se utilizan en procesos de amolado de interiores.

El diámetro de la muela utilizada dependerá de la velocidad de la herramienta, como se ha explicado anteriormente. Este influye tanto en el peso total, a mayor diámetro mayor peso, como en el área disponible para mecanizar, cosas que también hay que tener en cuenta para optimizar el proceso.

El sistema de sujeción es diferente para este tipo de abrasivos. Los discos tienen un agujero en el centro, a través del cual se introduce un mandril, luego este se pinza y se aprieta con una tuerca.

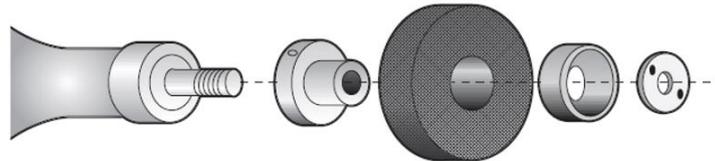


Figura 1.17. Sistema de sujeción de la muela.

El principio de arranque de material es indeterminado. A diferencia de lo que ocurre cuando se utiliza una máquina-herramienta estática, durante el uso de herramientas manuales no se obtiene siempre una viruta de las mismas características. Cada grano elimina un trozo de material al entrar en contacto con la superficie, pero a su vez el grano se desgasta y poco a poco va perdiendo sus propiedades abrasivas.

No obstante, esto es una ventaja, ya que permite el auto afilado de las muelas. Al usar la rueda, si se hace correctamente, los granos se desprenden en cuanto no pueden arrancar más material y los granos nuevos empiezan a formar una nueva superficie de corte.

El tercer y último proceso de amolado es el rectificado superficial. En este tipo de procesos se tiene mucho más en cuenta el acabado superficial que en el amolado de desbaste, pero también se utiliza en grandes superficies. Como ejemplos se tienen el lijado, desbarbado ligero y pulido. En general son operaciones que no modifican la forma básica o la dimensión de la pieza, solo su superficie, eliminando una mínima cantidad de material. Muchas veces ha de realizarse en varias etapas. Este es el ejemplo de amolado que más se difumina con otros procesos de mecanizado, como se ha mencionado anteriormente.

Las herramientas utilizadas son de cualquiera de los tres tipos, y además el giro del disco no ha de ser completo. Existen herramientas que permiten un modo orbital, en el que el movimiento de salida son pequeñas oscilaciones en lugar de vueltas completas.

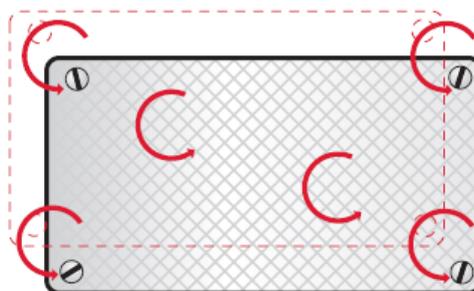


Figura 1.18. Ejemplo de movimiento orbital.

Los materiales abrasivos utilizados en este caso son los recubiertos, habitualmente en forma de discos o tiras, ya que son más flexibles. También hay versiones en las que el material se encuentra en forma de lámina unido radialmente alrededor de un vástago, conocidas como *flap-wheels*. Son las más utilizadas en este tipo de amolado.



Figura 1.19. Flap-wheel. [11].

Para aplicaciones que requieran un acabado más fino, como el pulido, se utilizan otro tipo de elementos abrasivos, más flexibles y suaves, normalmente recubrimientos de lana o abrasivos recubiertos de nylon.

El sistema de sujeción es similar al caso del amolado de precisión, con un mandril. Debido a que el abrasivo recubierto es en forma de lámina, será necesario utilizar algún tipo de soporte intermedio en el que, o bien con pegamento o con velcro, se acople la superficie con los granos.

A la hora de llevar a cabo el arranque de material, el abrasivo no debe mantenerse en un mismo punto por un largo periodo de tiempo, ya que esto hará que el abrasivo penetre en el material y no se obtenga el resultado superficial deseado. La fuerza de avance debe ajustarse a la velocidad de rotación, que debe estar entre un 60 y un 80% de la velocidad de rotación máxima de la herramienta. Además, para asegurar un mejor acabado es habitual que tras utilizar un abrasivo grueso, luego se haga otra pasada con un abrasivo con recubrimiento de nailon.

1.4.5. RIESGOS PARA LA SALUD DEL TRABAJADOR Y PRODUCTIVIDAD

El correcto mecanizado con una herramienta manual está determinado por una serie de factores que atañen directamente al operario que la utiliza.

En un primer lugar, la eficiencia del proceso depende de la velocidad y habilidad del individuo. Por otro lado, el entorno de trabajo es fundamental y en este caso el usuario está sometido a una serie de condiciones no apropiadas para que un ser humano esté expuesto con continuidad, lo que implica unas medidas de seguridad especiales. El operario está expuesto a las vibraciones de la herramienta, el ruido del proceso, polvo, etc. lo que, si no se controla o corrige, afectará negativamente al operador y a su productividad [12]; así como largos periodos en posturas incorrectas para desempeñar su tarea, con los consecuentes problemas óseos y musculares.

Esto implica limitar las herramientas a utilizar a herramientas ligeras y las más ergonómicas posibles del mercado; la compra de elementos desechables como gafas, cascos, mascarillas o incluso sistemas aspiradores de polvo, silenciadores para la herramienta, etc.

Además, hay que tener en cuenta que el amolado es un proceso peligroso en el que actúan grandes fuerzas y velocidades en conjunto con elementos abrasivos, por lo que hay que tener mucho cuidado a la hora de realizar cualquier tarea.

1.5. Estado del arte de robots de mecanizado

En la actualidad los robots industriales permiten dar mayor versatilidad a los procesos de manufactura y optimizarlos. Tienen una gran ventaja frente a las máquinas de mecanizado clásicas, y es la posibilidad de movimiento y el mayor rango de trabajo, pudiendo fácilmente alcanzar los 7 u 8 metros cuadrados. Cada vez es más habitual utilizar robots en procesos como el taladrado, el fresado o el amolado. La industria principal es la automovilística, aunque ninguna se queda al margen en estas nuevas tecnologías. No obstante, el mayor porcentaje de robots se emplean en tareas de manipulación o soldadura, mientras que para tareas de desbaste solo representan un 5% del total [13].

Campo de aplicación	Proceso industrial	Producto final
Todos los campos	Fresado	Prototipado rápido
Aeroespacial	Rectificado, pulido, taladrado, corte	Palas de turbina, mamparos, aislamientos, segmentos de ala
Automoción	Destapado, rectificado, taladrado, fresado, corte	Motores, cuadros de camiones, paneles de carrocería, manillas de las puertas, parachoques, matrices de estampación, núcleos de arena
Moda	Fresado, lijado	Moldes de maniquís, maniquís
Fundiciones	Desbarbado, fresado, taladrado, acabado	Moldes, piezas de fundición
Marina	Fresado	Lanchas de botes
Medicina	Rectificado, pulido	Prótesis
Entretenimiento	Fresado	Accesorios del decorado
Plásticos	Fresado	Moldes, cascos
Trabajo en madera	Fresado	Moldes para bañera de hidromasaje, muebles, molduras, barandillas, tableros para modelar

Tabla 1.2. Procesos industriales en los que se utilizan robots.

En general los robots de mecanizado no tienen problemas para tratar piezas con materiales blandos, aunque cuando el material a mecanizar es metal o cerámico empiezan a aparecer limitaciones para

desarrollar productos finales con acabados de tolerancias y calidad superficiales apropiadas. Esto es debido a que la precisión de los robots es peor que la de las máquinas convencionales de mecanizado, pues estas son más estables y de propósito específico. Además, otra desventaja de este tipo de robots son las altas fuerzas y vibraciones a las que están sometidos, lo que también provoca un peor acabado de las piezas.

No obstante, aunque en aplicaciones de pequeña escala en la que se requieren solo 3 ejes una máquina CNC parece mejor alternativa, en situaciones en las que se requiere acceder a partes complejas de la pieza, alcanzar mayores rangos de trabajo o contar con 4 o 5 ejes de movimiento, los robots siempre van a ser una mejor opción.

Hoy en día hay una gran variedad de estudios destinados a llevar a cabo procesos de rectificado, como se describen en los artículos [14] y [15], o marcas conocidas de robots industriales, como ABB o FANUC, ofrecen sus productos adaptados al proceso de mecanizado que se quiera llevar a cabo. No obstante, todos ellos tienen la desventaja de su limitación de posicionamiento. Es decir, todos se encuentran fijos en un punto, ya sea el suelo o la pared.

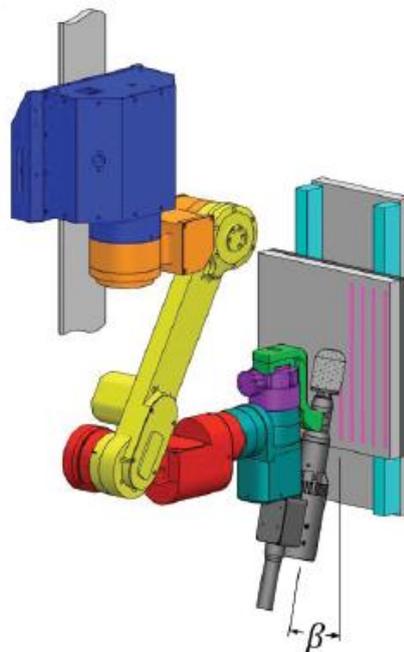


Figura 1.20. Ejemplo de prototipo industrial de robot de amolado.

1.6. Ventajas de este proyecto frente a otros

Este proyecto, con el desarrollo de un robot para la reparación de las imperfecciones de la chapa, que realice de forma independiente las tareas de posicionamiento y reparación, tiene la ventaja principal de su versatilidad, gracias a su capacidad de desplazamiento. Además, se pueden reducir tiempos (y por tanto costes) al eliminar al operario; mejorar la eficiencia al ejecutar las tareas siempre con la misma fuerza y evitar un desgaste excesivo del disco de la herramienta; planear las rutas de saneamiento eliminando el componente aleatorio de las pasadas; reducir costes en materiales de seguridad, como cascos o auriculares; mejorar la disponibilidad del operario para encargarse de otras tareas, evitando estrés y dolencias físicas en este.

1.7. Resumen del método

El objetivo de este documento es describir el desarrollo de un prototipo a pequeña escala que permita realizar tareas de mecanizado, similares a las que habría de realizar el robot final, con la idea de probar los algoritmos de control del proceso y comprobar su viabilidad. Las pruebas se van a realizar en pequeñas chapas de aluminio, eliminando deficiencias superficiales.

En un primer lugar, previamente al diseño del prototipo, se realizó un diseño simple de un entorno de simulación en 3D de una fábrica para exportarlo a un simulador de ROS, Gazebo, y poder ser utilizado por compañeros en sus pruebas, relativas a la parte de inspección. Esto consistió en un modelado en el programa CAD Solidworks de diferentes elementos industriales, como grúas, pilas de palets, etc. y su posterior inclusión en Gazebo, exportando el archivo CAD a un formato aceptado por el simulador y generando los archivos de código necesarios para su correcta definición. Para el apartado de saneado estos elementos no se tuvieron en cuenta, no obstante, forma parte del proyecto global.

Para el saneamiento de la chapa se realizaron varios diseños de un posible modelo de robot. En este caso se tuvieron en cuenta diferentes alternativas, en base a las diferentes exigencias de la empresa, entre las que se encuentran el uso de un brazo robótico industrial para la manipulación de la herramienta de saneo frente a sistemas más sencillos, como un conjunto de 3 ejes, similar a una máquina de coordenadas XYZ, un brazo fijo con posición regulable manualmente (o con ayuda de un motor) mediante un husillo y un conjunto de engranajes, etc.

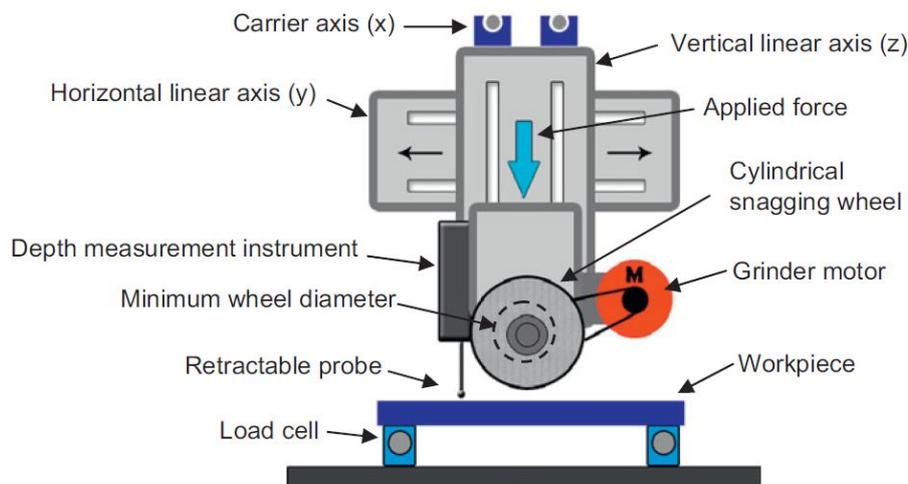
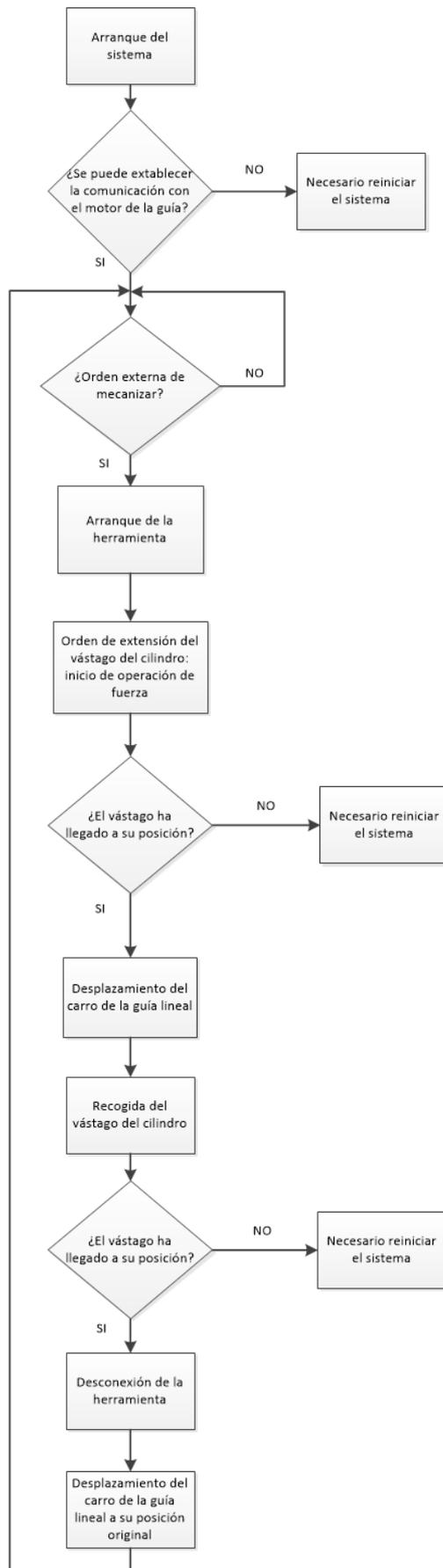


Figura 1.21. Ejemplo de robot de amolado de 3 ejes coordinados.

No obstante, la empresa optó por la elección de un diseño realizado por otro de sus colaboradores, por lo que todo lo mencionado anteriormente se descartó y se procedió a realizar un prototipo a pequeña escala con características similares a las que debería tener el modelo final. A partir de aquí las tareas consistieron en la selección de elementos adecuados para hacer un mecanismo lo más parecido posible, entre los que destacan principalmente 3: una guía lineal con husillo accionada por un motor paso a paso; un cilindro eléctrico accionado por un PLC; una herramienta manual de saneo (Dremel). Todos estos elementos, en conjunto con una Raspberry Pi 3 B+ trabajando como ordenador (PC) central, se unieron mediante la fabricación de piezas de chapa, mecanizadas en el mismo laboratorio, y perfiles de aluminio, para formar el prototipo final.

1.8. Flujograma



2. SOLUCIÓN PROPUESTA

Las condiciones sobre cómo habría de ser el sistema de saneamiento del robot han ido cambiando a lo largo del proyecto, en base a ideas o exigencias de la empresa. Lo que se ha mantenido siempre constante ha sido la herramienta a utilizar en el modelo definitivo del robot, por lo que todas las sugerencias de diseños y el desarrollo del prototipo han girado en torno a esa elección.

Inicialmente se tuvieron dos alternativas, ambas herramientas desarrolladas por la empresa *FerRobotics*. Ambas se diseñaron para destinar su funcionamiento al amolado y/o al desbarbado. Las principales diferencias entre ellas son en potencia, y consecuentemente dimensiones y peso.



Figura 2.1. Active Angular Kit 201.

La primera de las opciones es la de la figura anterior, denominada *Active Angular Kit*, AAK de aquí en adelante, 201, y tiene las siguientes características [17], con un peso de 8.5 kg:

AAK/201 - TYPICAL APPLICATIONS: GRINDING AND DEBURRING

Disc diameter	M14
Speed max [rpm]	10,000
Rated power/Continuous duty/S1 [W]	575
Peak power/Short-time duty/S2 [W]	1,500
Intermittent periodic duty/S3 [W]	700
Product force max (pull/push) [N]	160
Stroke	1,4"/35mm

Tabla 2.1. Características del AAK 201.

La otra opción es una herramienta similar, pero de mayor potencia, la AAK 601, con un peso de 20 kg.



Figura 2.2. AAK 601.

AAK/401 - TYPICAL APPLICATIONS: HEAVY GRINDING AND DEBURRING

Disc diameter	M14
Speed max [rpm]	8,500
Rated power/Continuous duty/S1 [W]	3,079
Peak power/Short-time duty/S2 [W]	5,969
Intermittent periodic duty/S3 [W]	4,021
Product force max (pull/push) [N]	500
Stroke	1,89"/48mm

Tabla 2.2. Características del AAK 601.

Ambas herramientas son amoladoras angulares, con alimentación neumática, optimizadas para el uso en el ámbito de la robótica. Permiten hacer un control total e individual de todos los parámetros del proceso: la velocidad de rotación, la fuerza de compresión que se ejerce sobre la superficie y el avance.

Existe un modelo intermedio, el 401, que no se llegó a considerar como una opción ya que la potencia es menor que en la 201, pues está destinada a utilizarse con piezas de pequeño tamaño.

Como principal diferencia entre ambas se puede comprobar que es la potencia. Una amoladora manual con la que suele trabajar un operario tiene una potencia nominal en torno a los 1000 Watos. Por un lado, la AAK 201 podría parecer que se queda corta, sin embargo, la AAK 601 tiene potencia en exceso, y llegados a este punto la cuestión son los costes.

2.1. Modelos propuestos

Todos los modelos se propusieron en base a las exigencias y especificaciones particulares de la empresa.

2.1.1. BRAZO ROBÓTICO COMERCIAL

Inicialmente se planteó la idea de utilizar un brazo robótico industrial, ya que la herramienta estaba diseñada para ese uso. Además, la base comercial a utilizar en el robot final para el desplazamiento de este por la nave es una base industrial de la compañía Robotnik, empresa que también oferta posibles brazos incorporables a sus bases.

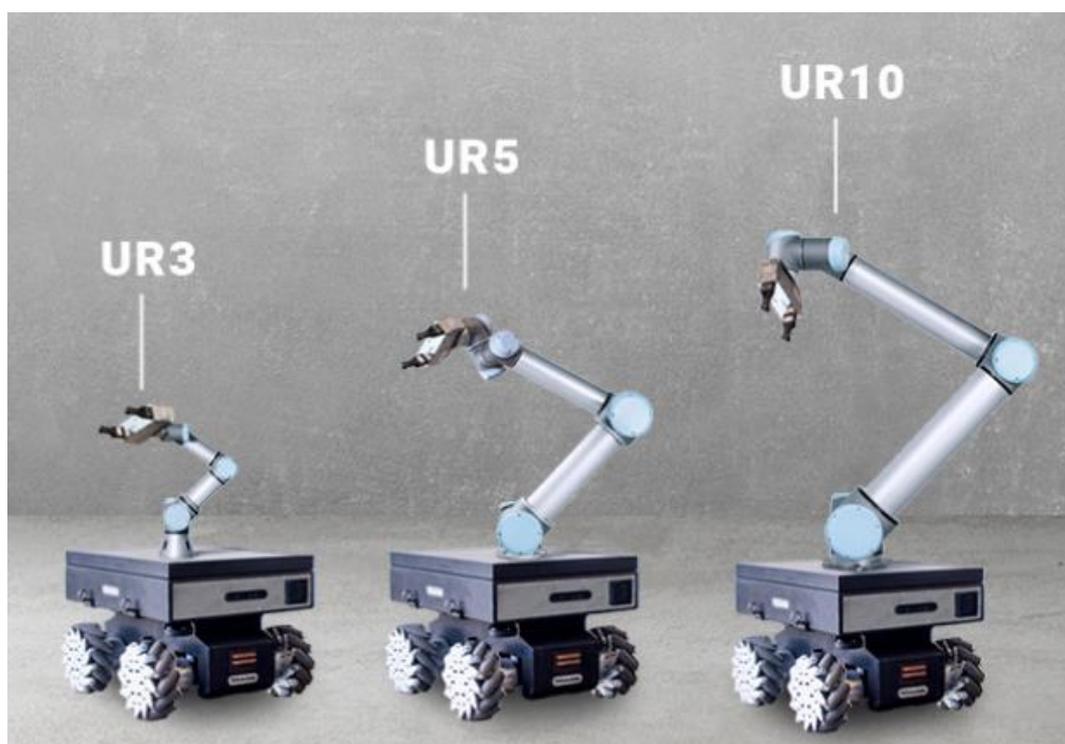


Figura 2.3. Bases de Robotnik con las alternativas de brazos.

Los brazos UR3/5 no entraban dentro de las alternativas valoradas ya que su capacidad de carga es muy inferior al peso de la herramienta más pequeña de las dos posibles; el UR 10, sí.

Dentro de los brazos industriales posibles se encuentran los de las dos siguientes tablas. La primera engloba brazos con capacidad de carga para la AAK 201 y la segunda para la AAK 601.

No obstante, utilizar un robot industrial implicaría la necesidad de utilizar un armario de control. Existen armarios compactos para poder utilizar este tipo de brazos en zonas con espacios reducidos, pero igualmente supone un incremento considerable del peso del vehículo, y por consiguiente un incremento de los costes al necesitar utilizar una base con mayor capacidad de carga. Además, la gran mayoría de ellos se alimentan desde corriente alterna por lo que sería necesario incluir un inversor, incrementando aún más el peso del conjunto. Por este motivo, la alternativa de utilizar un brazo robótico industrial comercial fue descartada.

Diseño de un robot de subsanación de imperfecciones en chapa

Compañía	Imagen	Designación	Carga útil (kg)	Peso (kg)	Alcance (mm)	Repetibilidad (mm)	Alimentación	GDL
Universal Robots		UR10	10	28,9	1300	±0,1	100-240 VAC	6
Yaskawa		Motoman H10	10	47	1200	±0,1	200-230V/50-60Hz	6
Hans Robot		Elfin E10	10	40	1000	±0,05	100-240V AC, 50-60Hz	6
Schunk		Dextrous Lightweight Arm LWA 4D	10	18	733	±0,15	24 V DC / avg. 5 A / max. 15 A	7
Kuka		LBR iiwa 14 R820	14	29,9	820	±0,15	200-230V/50-60Hz	7
Kassow Robots		KR810	10	23,5	850	±0,1	200-230V/50-60Hz	7

Tabla 2.3. Robots con capacidad de carga de al menos 8.5 kg.

Compañía	Imagen	Designación	Carga útil (kg)	Peso (kg)	Alcance (mm)	Repetibilidad (mm)	Alimentación	GDL
Yaskawa		Motoman SIA20F	20	120	910	0,1	-	7
Fanuc		M-20iA/35MT	35	187	1663	0,04	380-575V/50-60Hz	6
Fanuc		M-20iB/25	25	210	1853	0,02	380-575V/50-60Hz	6

Yaskawa		Motoman GP25	25	250	1730	0,06	380-480 VAC	6
Yaskawa		Motoman MH24	24	268	1730	0,06	200- 230V/56- 60Hz	6
ABB		IRB 2600	20	272	1650	0,04	200- 600V/50- 60Hz	6

Tabla 2.4. Robots con capacidad de carga de al menos 20 kg.

2.1.2. DISEÑOS PARTICULARES

Tras haber descartado la idea original del brazo industrial se propusieron varias alternativas. En primer lugar, se propuso el diseño de un brazo robótico similar a los industriales, pero diseñado desde cero y utilizando en todo momento motores con corriente continua y con un control más sencillo, eliminando tanto el armario como el inversor. Este podría tener el número de grados de libertad (gdl) que se quisiese, ya que los modelos comerciales son todos de 6 o 7, y para el saneamiento son números excesivos, con solamente 3 gdl sería suficiente.

Debido a esto, y ante la considerable complejidad de un brazo robótico, tanto en diseño como en construcción y costes en motores y mecanizado de piezas, se propuso un modelo equivalente a una mesa XYZ, similar al de la Figura 1.21. De esta forma, el movimiento en el eje vertical (Z) se utilizaría tanto para ejercer la presión sobre la chapa a mecanizar, como para elevar la herramienta durante el desplazamiento. Esto último a fin de no chocarse con obstáculos en el suelo, o contra la propia chapa al subirse a ella. Los otros dos ejes se utilizarían para definir el rango de trabajo.

No obstante, la base robótica comercial del robot incluye ruedas omnidireccionales, por lo que la necesidad de que la herramienta se desplace en los ejes X e Y es innecesario, ya que puede ser el propio robot el que lleve a cabo esa tarea, evitando pesos, brazos y costes innecesarios en el diseño. Por lo que la tercera alternativa planteada fue un brazo con un movimiento vertical utilizando una guía lineal.

El planteamiento del diseño, que se puede ver en la siguiente figura, consiste en un sistema vertical formado por un husillo y dos guías cilíndricas; dos piezas de sujeción unidas mediante un tornillo de gran diámetro junto con una tuerca de apriete; un muelle trabajando a tracción; y la herramienta. La guía vertical tiene como propósito la misma que en el caso mencionado anteriormente, la evasión de obstáculos y ejecución de presión. La finalidad tanto del tornillo con la tuerca y del muelle es para poder darle a la herramienta un ligero ángulo manualmente, ya que los operarios cuando realizan la tarea de amolado inciden en la chapa con un cierto ángulo. Sin embargo, este ángulo no está definido ni se tuvieron restricciones acerca de su valor, solamente que se pudiera modificar manualmente. Estos mecanismos sirven además para poder elevarla lo suficiente lateralmente como para que el operario tenga accesibilidad para realizar el cambio del disco

cuando sea necesario. Como alternativa al tornillo y el muelle se podría utilizar un conjunto de engranajes con una rueda activada manualmente o un motor activado mediante un pulsador.

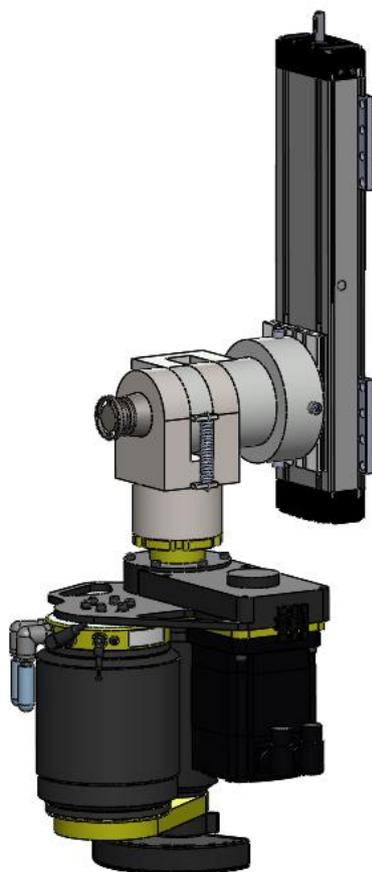


Figura 2.4. Sistema propuesto.

Finalmente, el diseño del robot no fue ninguno de los anteriores, sino uno realizado por uno de los participantes en el proyecto por parte de la empresa, siendo el modelo en 3 dimensiones el siguiente:

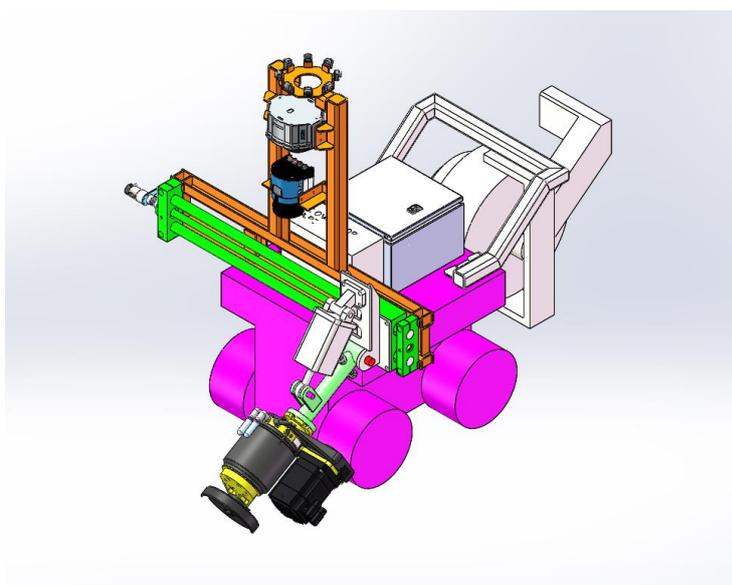


Figura 2.5. Modelo robot definitivo, diseñado por la empresa.

El diseño incluye la herramienta AAK 601 de *FerRobotics*; la base móvil Summit XL-Steel de *Robotnik*; una guía LTE30-A de *Schaeffler* para un rango de trabajo lateral; un cilindro neumático de *Asco Numatics*, para darle ángulo a la herramienta; un mini compresor sin aceite MC serie 100 de la marca *Fenix* para alimentar tanto el cilindro como la herramienta; los correspondientes sensores y cámaras para el posicionamiento por la nave. Además, incluye en su parte trasera un carrete para enrollar cable. Esto se debe a que a mediados del proyecto se incluyó una funcionalidad de poder utilizar el robot conectado a la red en lugar de con baterías, y otra de poder ser manejado por un operario en lugar de autónomamente.

Teniendo en cuenta estos elementos se llevó a cabo un prototipo que emulase lo máximo posible el diseño y funcionalidad del robot. El prototipo consta de los siguientes elementos fundamentales: una amoladora manual, un cilindro eléctrico y una guía lineal. En los siguientes apartados se describe su proceso de selección y las características funcionales de cada uno.

2.2. Prototipo: herramienta

A fin de simular lo máximo posible el diseño del robot final se hizo una comparativa y selección de posibles herramientas a utilizar para emular la AAK 601. Se buscaron herramientas alimentadas con batería en lugar de tensión de red para facilitar posteriormente la adaptación a su funcionamiento con la batería externa que alimenta al conjunto del prototipo.

Modelo	Imagen	Tensión de la batería (V)	Capacidad (Ah)	Peso (kg)	Velocidad rotación (rpm)	Dimensiones (mm)	Diámetro disco de trabajo (mm)
Dremel 8100		7,2	1,3	0,413	variable	220x35x55	19
Dremel 8220		12	2	0,66	5000-15000	250x45x65	19
Bosch GRO 12V-35 Professional		12	GBA 2/3/4/6	aprox 0,44	5000-35000 (en vacío)	250x160x80	38

Bosch GWS 18 V-LI Professional		18	GBA 1.5/2/3/4/5 PROcore 8/12	0,9	10000 (en vacío)	320x102 x100	115
Bosch GWS 18 V-115C Professional		18	GBA 1.5/2/3/4/5 PROcore 8/12	2 + batería	9000 (en vacío)	358x110 x360	115
Einhell TE- AG 18 Li- Solo		18	3 (recomenda da)	2,05	8500 (en vacío)	290x 42x108	115

Tabla 2.5. Comparativa de posibles herramientas para el prototipo.

Los tres primeros modelos son herramientas multifunción de tipo recto, mientras que los tres últimos son amoladoras angulares. La herramienta seleccionada finalmente fue la Dremel 8220, y las causas son variadas.

Un primer motivo es que, a pesar de que la AAK 601 es una amoladora de tipo angular, en forma es más similar a la Dremel que a una amoladora angular manual. Entre las dos Dremel, el modelo 8220 es mejor ya que la tensión de alimentación es una tensión más estandarizada, por lo que hay más cantidad de componentes que puedan trabajar a esta tensión, y se podría utilizar la misma batería para todos los elementos del prototipo; además tiene mayor capacidad, aunque las dimensiones y el peso sean ligeramente mayores.

Entre la Dremel y el modelo de Bosch, el motivo principal fue la variedad de productos específicos para la herramienta. La compañía Dremel se dedica, desde 1932, casi en exclusiva al diseño de herramientas rotativas, y dispone de un gran catálogo de complementos y accesorios; mientras que Bosch, debido a que tiene una mayor variedad de productos, dispone de menos ofertas de elementos específicos para aumentar la versatilidad de una herramienta concreta.

2.2.1. HERRAMIENTA ELEGIDA Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Las características principales de la Dremel 8220 y sus componentes internos se definen a continuación [18].

Voltaje de la batería	12.0 V
Capacidad de la batería	2.0 Ah
Tiempo de carga	1.5 h
Peso	0.660 kg
Longitud	250 mm
Ancho	45 mm
Profundidad	65 mm
Tecnología de la batería	Lithium-Ion / ECP
Velocidad variable	5,000- 35,000 rpm

Tabla 2.6. Propiedades de la Dremel 8220.

El rango de velocidades de la herramienta y por tanto su capacidad para mecanizar, se modifica mediante un interruptor regulable entre 5 y 30. A cada posición del interruptor le corresponde un rango de velocidades específico, definido en la tabla a continuación:

Posición del interruptor	Rango de velocidades (rpm)
5	5000 – 7000
10	7000 – 10000
15	13000 – 17000
20	18000 – 23000
25	23000 – 27000
30	28000 – 35000

Tabla 2.7. Rango de velocidades de la Dremel 8220.

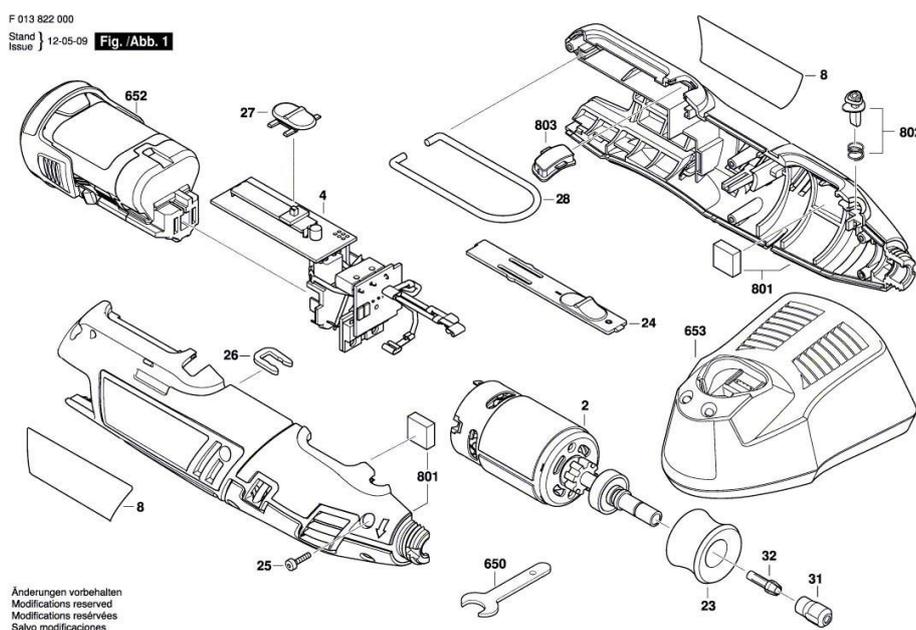


Figura 2.6. Elementos que conforman la Dremel 8220.

Número de referencia en la imagen	Elemento
2	Motor
4	Circuito electrónico
8	Etiqueta
23	Cabezal EZ Twist
24	Interruptor de encendido
25	Tornillo
26	Clip de fijación
27	Cubierta de interruptor de regulación de velocidad
28	Gancho de sujeción
31	Tuerca
32	Pinza de sujeción de accesorios de herramienta
650	Llave de apriete de tuerca
652	Batería
653	Cargador de la batería
801	Carcasa
802	Botón de liberación de la tuerca para apretar/aflojar la pinza
803	Cubierta de LEDs de indicación de batería

Tabla 2.8. Lista de componentes de la Dremel 8220

El interruptor de encendido y apagado ha sido sustituido por un circuito externo, formado por un relé y conectado a una Raspberry Pi, de forma que esta gobierne si la herramienta está funcionando o no. Dicho circuito se explicará en el apartado 2.6

2.3. Prototipo: cilindro eléctrico

La herramienta AAK 601 de *FerRobotics* incluye un sistema neumático para controlar la fuerza que se hace sobre la pieza de trabajo. Este se conoce como *Active Contact Flange (ACF)*, tiene una carrera máxima de 35.5 mm y asegura una fuerza constante durante todo el proceso de mecanizado.

Para simular esto lo que se ha hecho ha sido utilizar un cilindro eléctrico. Es cierto que en la herramienta original el elemento es neumático, pero el motivo de descartar este tipo de método se explica a continuación.

En una aplicación industrial se requieren fiabilidad, robustez, eficiencia y precisión, no sin olvidar los costes. Por un lado, los cilindros neumáticos son una buena alternativa para abaratar gastos; sin embargo, los actuadores eléctricos alcanzan mayor control y precisión. Esto no significa que los actuadores neumáticos no puedan alcanzar funcionamientos precisos, pero si en menor medida; todo depende de la exactitud que se necesite en la tarea que el cilindro va a llevar a cabo. En la aplicación que se describe en este documento, puesto que el objetivo es eliminar deficiencias superficiales, de dimensiones generalmente grandes, en una chapa, la precisión no es un factor determinante. Por lo que es necesario comparar otros aspectos que diferencien estas dos tecnologías [19].

Los cilindros neumáticos son los actuadores con mayor fuerza y velocidad por unidad de tamaño que cualquier otra tecnología de actuador, excepto la hidráulica, y a bajos costes. No obstante, son los componentes de los aparatos neumáticos los que tienen costes reducidos, ya que los importes

de mantenimiento y operación pueden ser elevados. Estos incluyen los gastos de reemplazo del cilindro, la instalación y el mantenimiento de la línea de aire y la electricidad para el compresor.

El coste operativo por dispositivo neumático varía en gran medida, dependiendo del número de elementos que estén trabajando simultáneamente. Por ejemplo, si originalmente había 500 dispositivos neumáticos utilizando un compresor, el gasto por dispositivo puede ser de unos 100 dólares de media al año; pero si la línea de producción se reduce a 50 dispositivos, entonces el coste por dispositivo puede llegar a aumentar hasta diez veces.

Por su parte, los actuadores eléctricos proporcionan un control y posicionamiento precisos, permiten implementar procesos industriales más flexibles y tienen un bajo coste de operación, a pesar de su mayor precio inicial. Son más económicos cuando se utilizan en una escala moderada y cuando los componentes electrónicos de control se encuentran separados del actuador principal, a fin de segmentar y minimizar los costes de reemplazo. Los costes operativos de los actuadores eléctricos se deben fundamentalmente al consumo de energía del motor.

Por otro lado, el utilizar un cilindro neumático implica disponer de un sistema de aire a presión en las instalaciones donde se realicen las pruebas, y/o muestras públicas de funcionamiento, o un compresor de aire. En esta aplicación no se necesita ni altas precisiones ni velocidades, y puesto que solamente se necesita un cilindro, por lo mencionado anteriormente económicamente es más rentable el cilindro eléctrico.

2.3.1. CILINDRO ELEGIDO Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El cilindro seleccionado es de SMC, una compañía japonesa, dedicada al desarrollo de productos destinados a la automatización desde 1959. Está especializada en la fabricación de cilindros neumáticos y sus sistemas de control, pero en los últimos años ha ido incrementando su catálogo para adaptarse a la industria actual.

El modelo de cilindro es el LEYG25MB-100 [20], en conjunto con el controlador LECP6P1 [21].

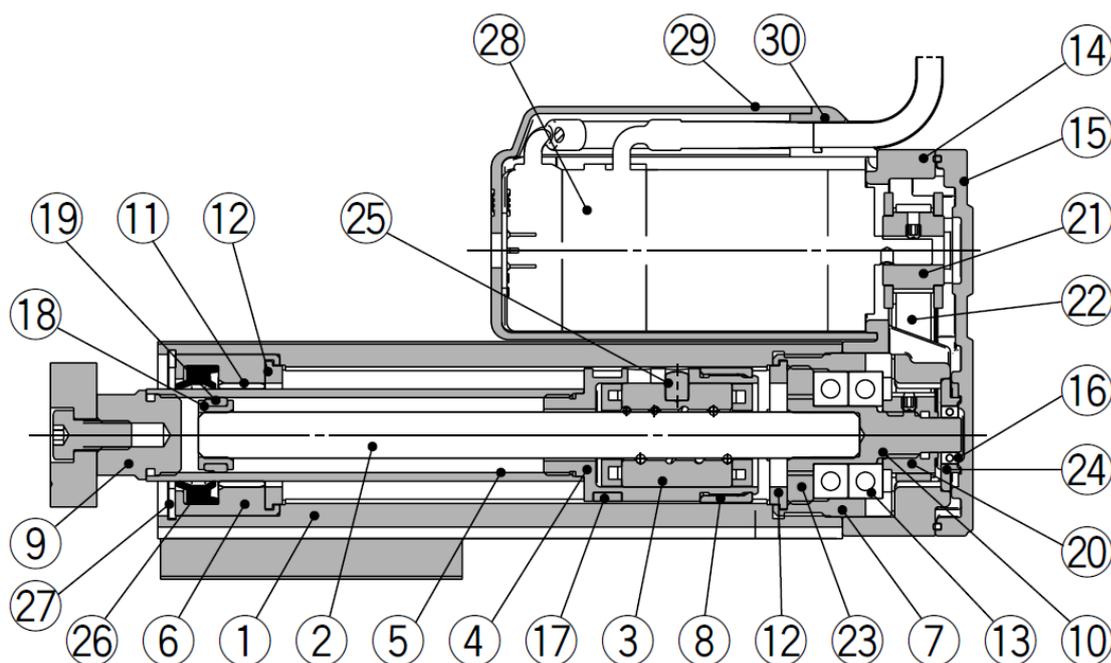


Figura 2.7. Elementos que conforman el LEYG25MB-100.

Component Parts

No.	Description	Material	Note
1	Body	Aluminum alloy	Anodized
2	Ball screw (shaft)	Alloy steel	
3	Ball screw nut	Resin/Alloy steel	
4	Piston	Aluminum alloy	
5	Piston rod	Stainless steel	Hard chrome anodized
6	Rod cover	Aluminum alloy	
7	Housing	Aluminum alloy	
8	Rotation stopper	POM	
9	Socket	Free cutting carbon steel	Nickel plated
10	Connected shaft	Free cutting carbon steel	Nickel plated
11	Bushing	Lead bronze cast	
12	Bumper	Urethane	
13	Bearing	—	
14	Return box	Aluminum die-cast	
15	Return plate	Aluminum die-cast	
16	Bearing	—	
17	Magnet	—	
18	Wear ring holder	Stainless steel	Stroke 101 mm or more
19	Wear ring	POM	Stroke 101 mm or more
20	Pulley for screw shaft	Aluminum alloy	
21	Pulley for motor	Aluminum alloy	
22	Belt	—	
23	Bearing stopper	Aluminum alloy	
24	Bearing support	Stainless steel	
25	Parallel pin	Stainless steel	
26	Rod seal	NBR	
27	Retaining ring	Steel for spring	Phosphate coated
28	Step servo motor	—	
29	Motor cover	Synthetic resin	
30	Grommet	Synthetic resin	

Tabla 2.9. Lista de componentes del LEYG25MB-100.

Las características principales del cilindro son:

Modelo	Diámetro husillo (mm)	Fuerza de empuje (N)	Carga vertical (kg)	Velocidad máxima (mm/s)	Carrera
LEYG25M	6	238	15	250	100

Tabla 2.10. Características técnicas básicas del cilindro.

Los datos de la tabla anterior son valores máximos. Sin embargo, las condiciones de funcionamiento óptimas del cilindro vienen definidas por una serie de gráficas, en función del uso que se le vaya a dar (posición de montaje vertical u horizontal), la carga que vaya a soportar y el tipo de guía que tenga el cilindro. De esta última hay dos tipos: de cojinetes de deslizamiento y de cojinetes de bolas. El LEYG24MB es del primer tipo, y estará dispuesto en un montaje vertical.

Además, también dependen del tipo de motor, en este caso un motor paso a paso de 24 V.

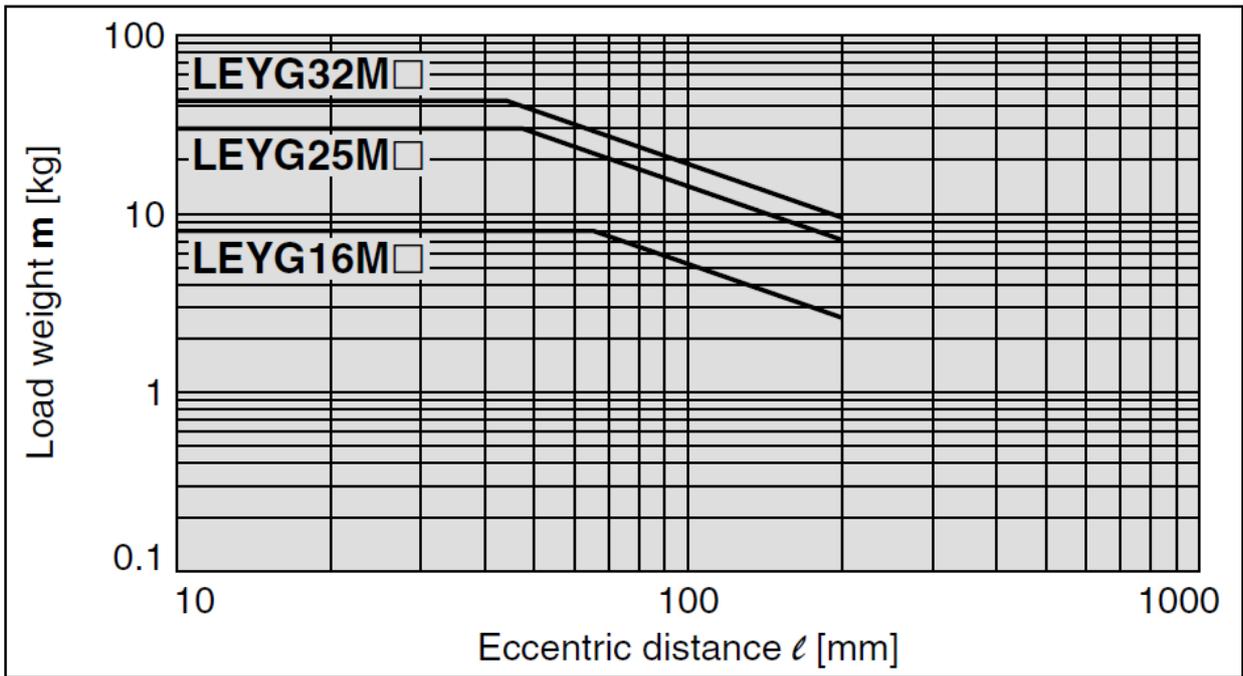


Figura 2.8. Carga máxima en función de la carrera.

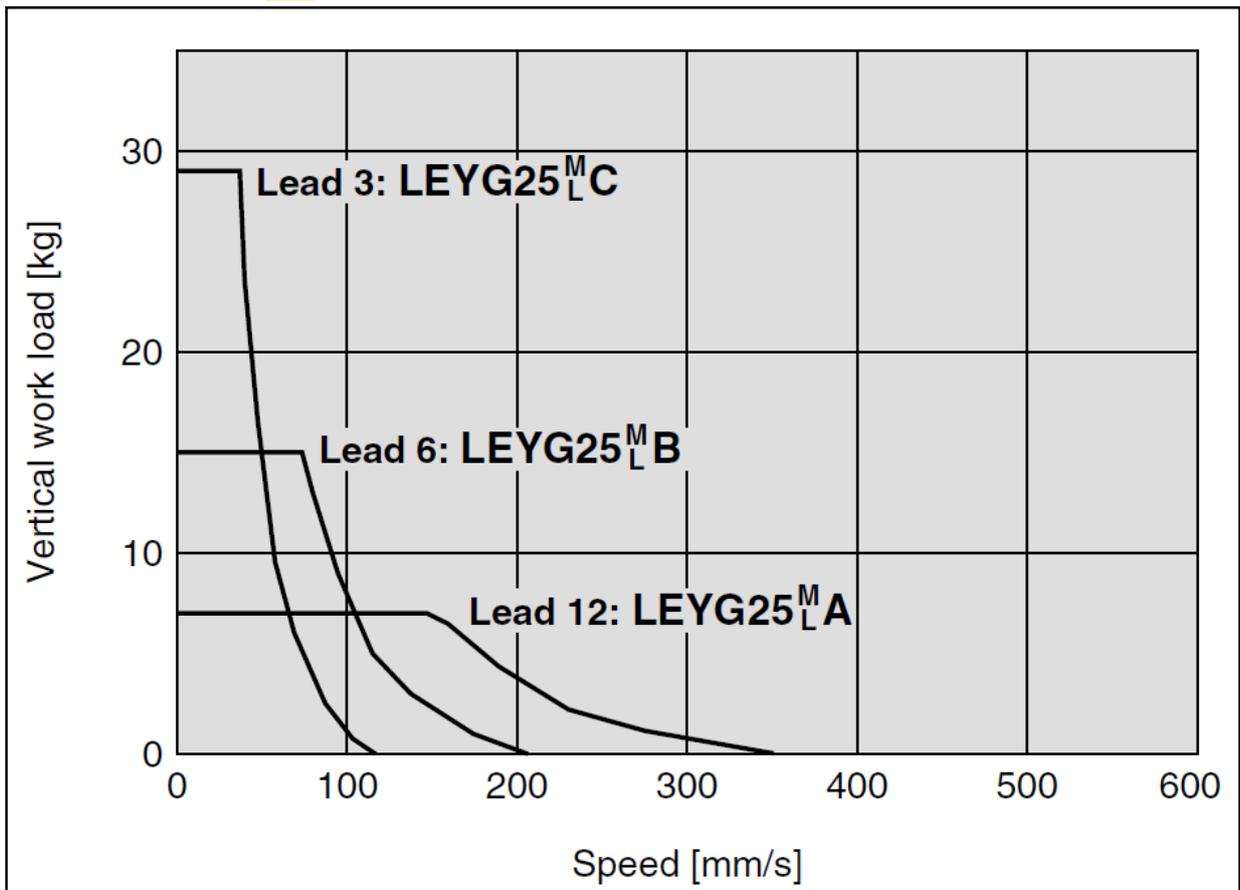


Figura 2.9. Velocidad máxima en función de la carga.

El LEYG25MB tiene dos funcionalidades: de posicionamiento o de empuje. En el primer caso, el cilindro se desplaza a una posición objetivo, mientras que, en el segundo caso, además de desplazarse realiza una operación de fuerza, cuyo funcionamiento se detallará más adelante al explicar las características del controlador del cilindro. Esto es relevante en este punto del documento ya que la fuerza máxima que puede ejercer el cilindro en dicha operación está también relacionada con la velocidad y la carga y tiene una gráfica que la define.

En este tipo de cilindro la fuerza de la operación de empuje se puede definir en torno a un 35 y un 65% de la fuerza máxima, correspondiendo a un intervalo de velocidades de entre 11 y 20 mm/s. Además, hay que tener en cuenta que la carga vertical será diferente, siendo como máximo de 4 kg.

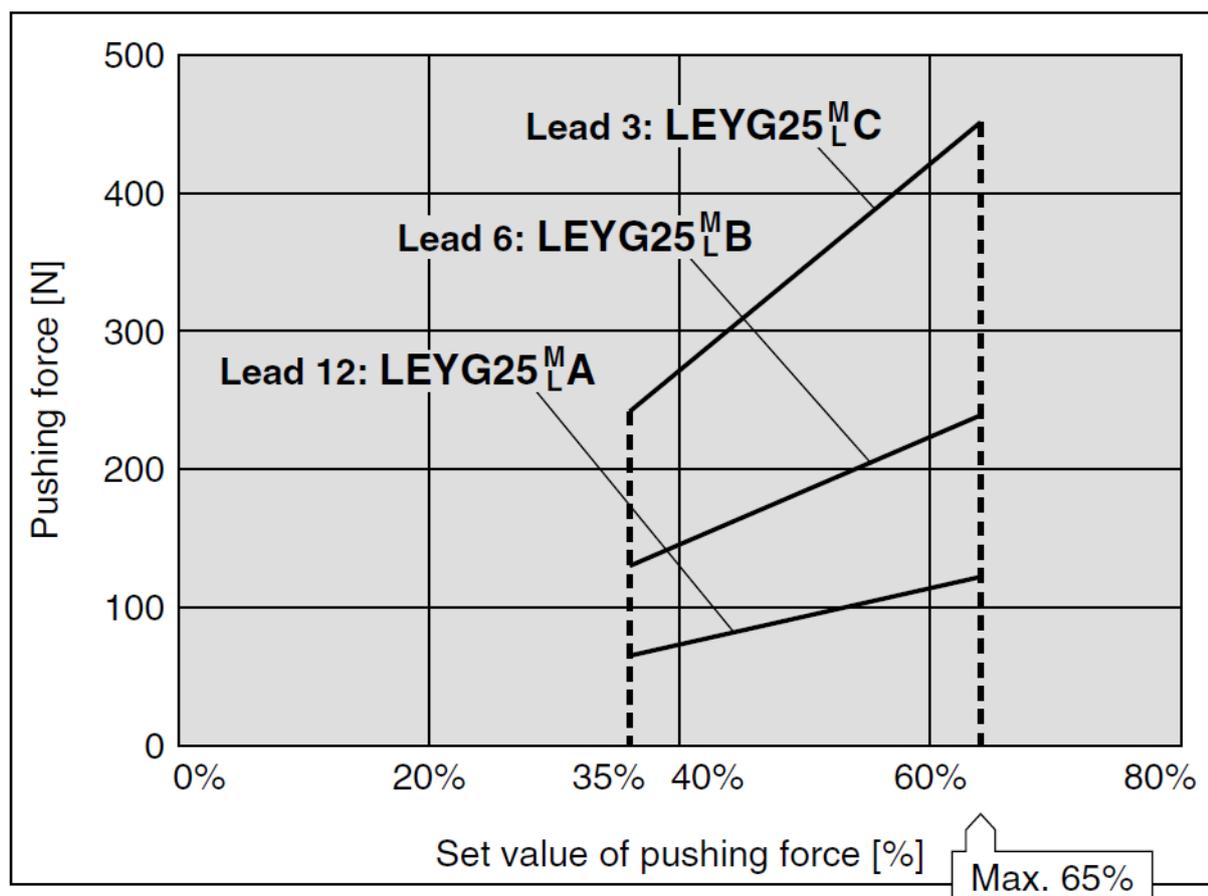


Figura 2.10. Equivalencia en Newtons del valor de porcentaje de fuerza en la operación de empuje.

Una tabla más detallada de las características del cilindro se puede ver en la página siguiente.

Por otro lado, el controlador utilizado es el LECP6P1. Permite operaciones de posicionamiento y operaciones a velocidad y fuerza específicas. La tensión de alimentación (24 VDC) es independiente en el circuito de control y en el de accionamiento, de forma que, aunque esta última se pierda, el control puede seguir activo y todas las señales de información del encoder sobre la posición pueden seguir disponibles.

Cuenta con un pin (EMG) que, si no está conectado a tensión de alimentación, el cilindro no se pondrá en marcha. Se debe a que el controlador incluye una funcionalidad que hace que se pueda llevar a cabo una parada controlada. Esto es que al eliminar los 24 VDC del pin EMG, el controlador desacelera el actuador con el máximo valor de desaceleración para el actuador.

	Característica	Unidades	Valor	Comentarios
Especificaciones del actuador	Carrera	mm	100	
	Carga horizontal	kg	30	Con aceleración/deceleración de 3000 mm/s ² . Valor máximo de carga para la operación de posicionamiento. Para la operación de fuerza la carga máxima es igual a la vertical.
	Carga horizontal*	kg	50	Con aceleración/deceleración de 2000 mm/s ²
	Carga vertical	kg	15	Con aceleración/deceleración de 3000 mm/s ² . La velocidad depende de la carga. Ver Figura 2.9.
	Fuerza de empuje	N	126 a 238	
	Velocidad	mm/s	9 a 250	
	Velocidad de empuje	mm/s	35 o menos	Como mínimo el valor de "Velocidad"
	Aceleración y deceleración máx..	mm/s ²	3000	
	Repetibilidad de posicionamiento	mm	+/- 0.02	
	Diámetro del husillo	mm	6	
	Resistencia a impactos/vibraciones	m/s ² °	50/20	
	Tipo de actuador			Husillo de bolas y correa
	Tipo de guía			Cojinete de deslizamiento
	Especificaciones eléctricas	Rango de temperatura de operación	°C	5 a 40
Rango de humedad de operación		%	35 a 85	
Tamaño del motor		mm	42	Forma cuadrada
Tipo de motor				Motor paso a paso (servo 24 VDC)
Encoder				Incremental de 2 fases, 800 pulsos/rotación
Tensión nominal (DC)		V	24	+/- 10%
Consumo de energía		W	40	Consumo en operación. Incluye el controlador.
Consumo de energía en espera		W	15	Consumo de energía en espera durante el funcionamiento (actuador parado en posición). Incluye el controlador.
Consumo de energía máximo puntual		W	48	Consumo en operación. Incluye el controlador.
Peso del controlador	kg	0.15	Montaje con tornillos	
Peso del motor	kg	2.18		

Tabla 2.11. Características completas del cilindro.

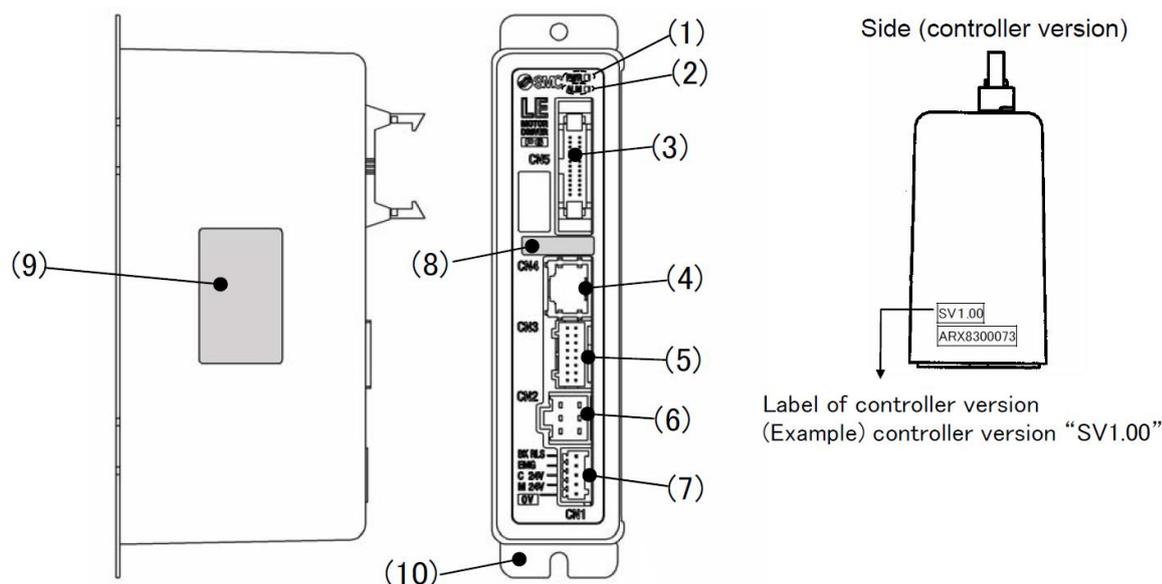


Figura 2.11. Elementos que conforman el LECP6P1.

No.	Label	Name	Description
1	PWR	Power LED (green)	Power ON/No alarm: Green light Data (step data, parameter) writing /green light flashing ⚠ caution Do not turn off the controller input power or remove the cable while data is being written (green light flashing). *Data (step data ,parameter) may not be written correctly.
2	ALM	Power LED (red)	Power ON/Alarm: Red light
3	CN5	Parallel I/O Connector (26 pins)	Used to connect PLC, etc. with the I/O cable. (11 inputs and COM, 13 outputs and COM)
4	CN4	Serial I/O Connector (9 pins)	Used to connect the teaching box, PC, etc.
5	CN3	Encoder connector (16 pins)	Used to connect the actuator cable.
6	CN2	Motor power connector (6 pins)	
7	CN1	Power connector (5 pins)	Used to connect the controller power supply (24VDC) with the power supply plug. Common power(-),Motor power (+),Control power(+),Stop signal(+),Lock release(+)
8	-	Compatible actuator label	The label indicating the applicable actuator model. It also indicates the type of the parallel I/O (PNP/NPN).
9	-	Controller label	The label indicating the part number of the controller.
10	-	FG	Functional ground

Tabla 2.12. Lista de componentes del LECP6P1.

El controlador tiene almacenados en memoria con un código numérico, hasta un máximo de 64, todas las posiciones u operaciones de fuerza que ha de realizar, y es posible seleccionar aquellas que se quieran. En estas posiciones de memoria además del valor de posición o fuerza se definen la velocidad, aceleración, etc. de la operación. Esto se puede hacer desde el propio software del controlador (conector CN4) o a través de un PLC (conector CN5). El puerto CN5 cuenta con 6 pines (IN0 a IN5) para definir de forma binaria el código numérico de la entrada de memoria que se quiera utilizar. Por ejemplo, si se tiene definida en la posición 5 una operación de fuerza, para activarla (ponerla en estado alto, a 24 V) es necesaria la siguiente combinación de entradas:

IN0	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5
1	0	1	0	0	0

Tabla 2.13. Ejemplo de combinación de entradas para seleccionar una posición de memoria.

Para poder utilizar el prototipo como un sistema automatizado fue necesario manejar el controlador desde un PLC. Los pines y señales que hay que utilizar son los siguientes:

* PNP type

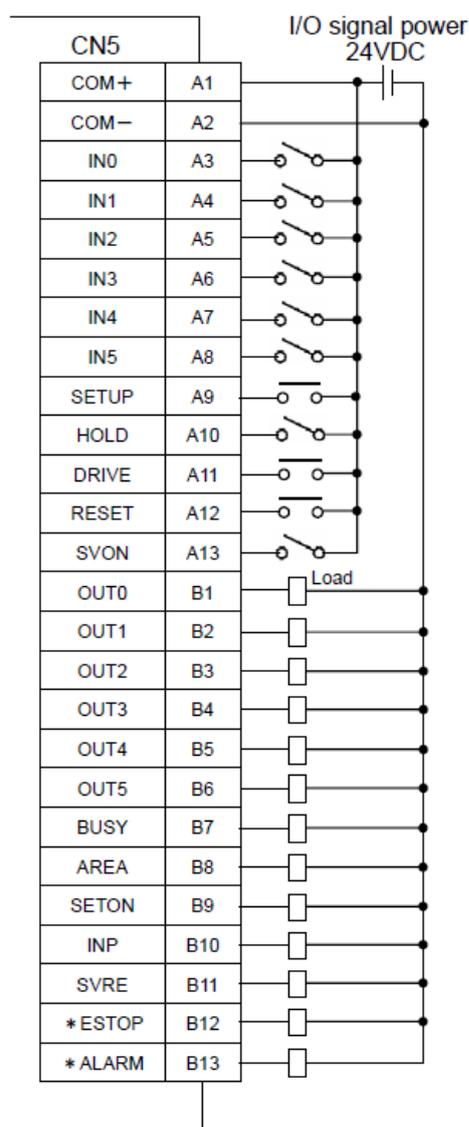


Figura 2.12. Señales del controlador para el manejo del cilindro y correspondiente código de cableado (Ax/Bx).

Las entradas IN1 a 5 se han explicado anteriormente. Las salidas OUT1 a 5 se activan en función de la entrada correspondiente en estado alto.

El funcionamiento del conjunto de señales es muy sencillo. Al activar la señal SVON se enciende el motor, de forma que SVRE se activa. El siguiente paso es llevar al cilindro a su posición de inicio, antes de hacerlo funcionar en cualquier ciclo. Para ello hay que activar la señal SETUP, que ordenará al sistema desplazarse al punto definido como origen. Una vez haya llegado se activará la salida SETON y el cilindro estará disponible para ejecutar las instrucciones almacenadas en memoria. Para ello, solamente hay que activar las correspondientes señales de IN, y después encender la señal DRIVE. Entonces la salida BUSY pasará a nivel alto, hasta que el cilindro alcance la posición deseada, o realice la operación de empuje requerida, en cuyo caso se desactivará BUSY y se activará INP (*in position*).

Es posible definir un área en la que se quiere saber si el cilindro se encuentra dentro o no. En caso de estar definida, se activará o desactivará la señal AREA.

La señal HOLD se puede activar para parar la operación, sin reiniciar la posición.

En la señal ALARM, el asterisco indica que es activa a nivel bajo, es decir, cuando hay 0 VDC. Para apagar una alarma hay que activar la señal de RESET. Después de esto es recomendable volver a llevar el cilindro al origen.

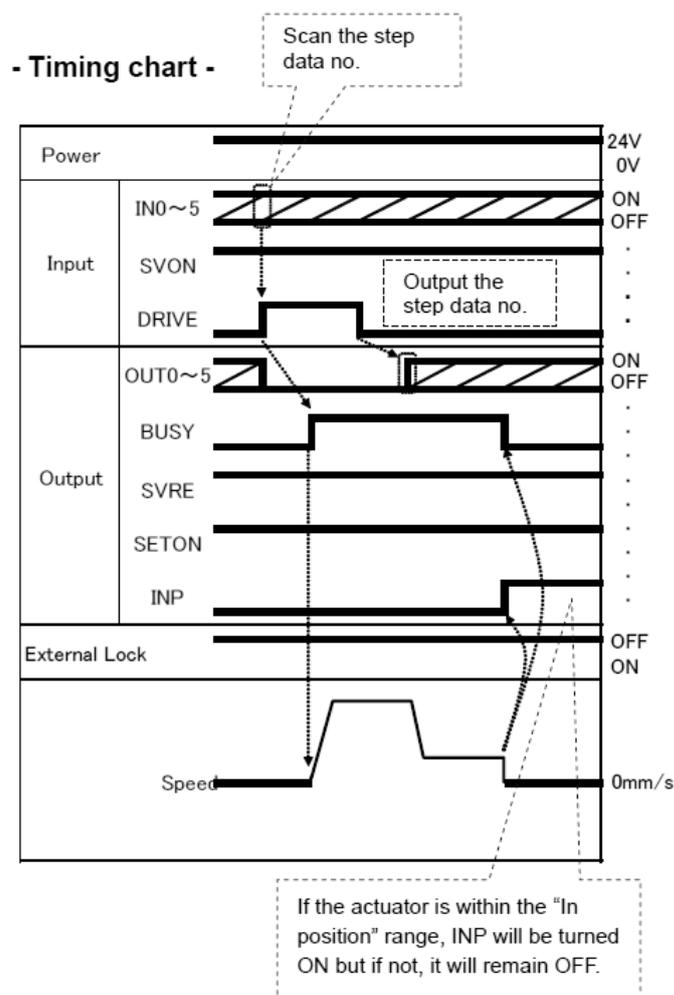


Figura 2.13. Ejemplo de ciclo.

Para llevar a cabo la operación de fuerza, hay que definir una velocidad de posicionamiento, de forma que el cilindro se desplace hasta una posición indicada. Después, a la velocidad de empuje indicada en la memoria se ejecutará la operación de fuerza. En la siguiente imagen se puede ver una descripción gráfica del proceso.

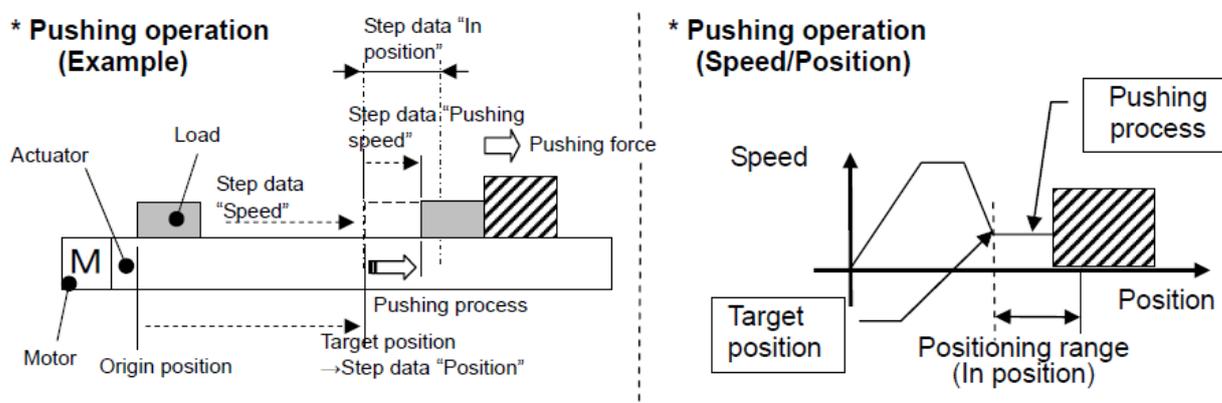


Figura 2.14. Descripción gráfica de la operación de fuerza.

Si por algún motivo la operación de fuerza no llega a realizarse, la señal INP nunca llegará a activarse.

In such case, the INP output will be turned OFF.

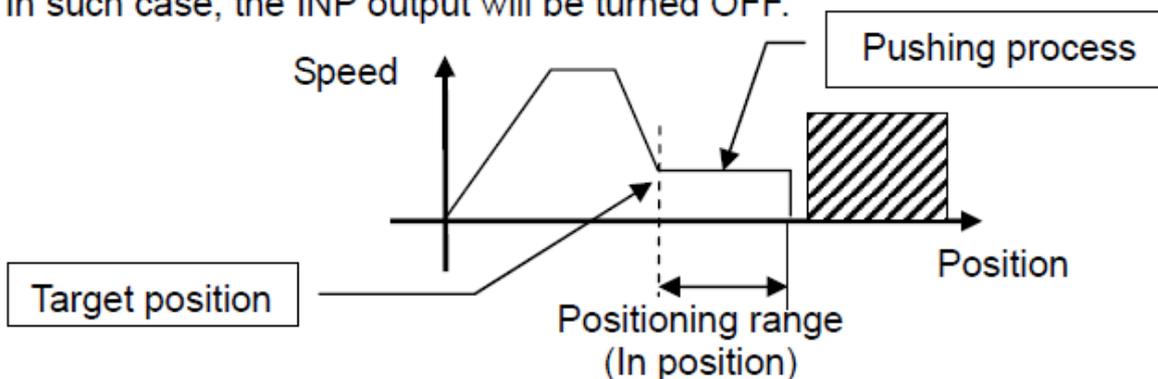


Figura 2.15. Error en operación de fuerza.

2.3.2. PLC

Como se ha mencionado anteriormente, para manejar el controlador es necesario utilizar un PLC. El elegido para esta aplicación ha sido un modelo de la marca Omron, en concreto el CP1E-N30DR-D [22]. Dispone de 15 entradas y 15 salidas y el envío de datos desde el ordenador al PLC se puede hacer a través de comunicación USB o RS232. Una vez cargado el programa en el PLC no es necesario seguir comunicándose con él.

Es necesario alimentar el PLC a 24 VDC. Las entradas y salidas tienen un pin común, en el caso de las entradas unido a tensión de referencia y en el de las salidas a tensión positiva de alimentación. El esquema eléctrico de las conexiones se puede ver en los anexos.

Los cables del CN5 del controlador tienen un código de colores y marcas para identificar cada señal. La correspondencia entre cables y entradas/salidas del PLC de la aplicación descrita en este documento de detalla en la tabla de la siguiente página.

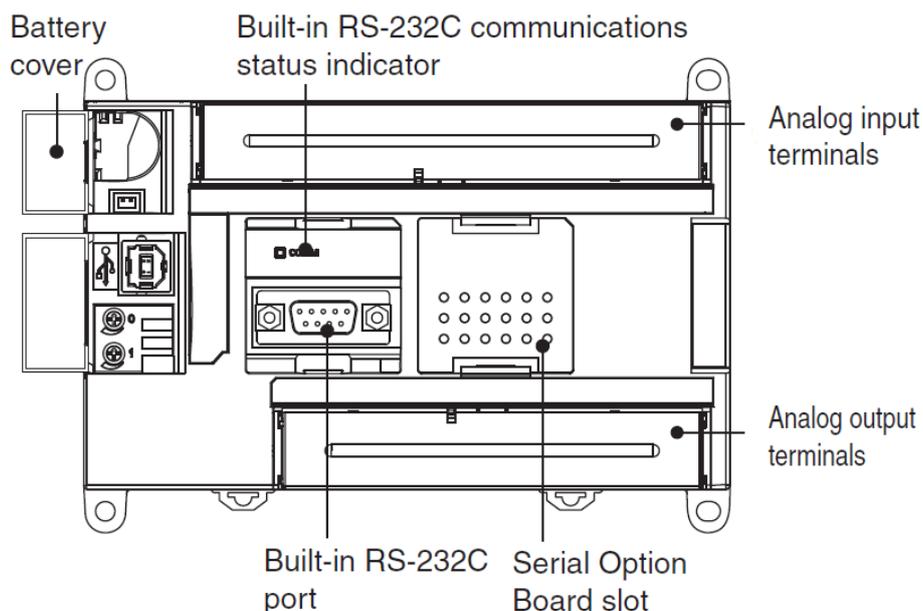


Figura 2.16. Elementos que conforman el CPIE-N30DR-D.

Salidas controlador/Entradas PLC		Pin Controlador	Color cable	Marca	PLC
BUSY	Motor en marcha	B7	Blanco	▪ ▪ Rojo	0.03
SETON	Cilindro en posición de origen	B9	Marrón claro	▪ ▪ ▪ Rojo	0.04
INP	Fuerza o posición objetivo alcanzadas	B10	Amarillo	▪ ▪ ▪ Negro	0.05
SVRE	Servomotor encendido	B11	Amarillo	▪ ▪ ▪ Rojo	0.06
ALARM	Señal de alarma (Normalmente cerrado)	B13	Verde claro	▪ ▪ ▪ Rojo	0.07

Entradas controlador/Salidas PLC		Pin Controlador	Color cable	Marca	PLC
IN0	Combinaciones de movimientos	A3	Amarillo	▪ Negro	100.00
IN1	Combinaciones de movimientos	A4	Amarillo	▪ Rojo	100.01
IN2	Combinaciones de movimientos	A5	Verde claro	▪ Negro	-
IN3	Combinaciones de movimientos	A6	Verde claro	▪ Rojo	-
IN4	Combinaciones de movimientos	A7	Gris	▪ Negro	-
IN5	Combinaciones de movimientos	A8	Gris	▪ Rojo	-
SETUP	Volver al origen	A9	Blanco	▪ Negro	100.05
DRIVE	Ejecutar programa	A11	Marrón claro	▪ ▪ Negro	100.06
RESET	Apagar alarma o parar ejecución de programa	A12	Marrón claro	▪ ▪ Rojo	100.07
SVON	Encender el motor	A13	Amarillo	▪ ▪ Negro	100.04

Tabla 2.14. Relación entre salidas/entradas del controlador del cilindro y de PLC.

Solo se han definido dos posiciones de memoria, la 2, para la operación de fuerza, y la 1 de recogida del cilindro, por lo que solo son necesarias las conexiones de IN0 a IN1.

Se ha utilizado una entrada adicional, la 0.08, a la que se envía un pulso desde el PC que gobierna el prototipo, en este caso una Raspberry Pi, para dar la orden de iniciar los ciclos deseados del cilindro.

2.4. Prototipo: guía lineal

Para la selección de la guía lineal que se puede utilizar hay muchas alternativas. No obstante, puesto que en el diseño realizado por la empresa se utiliza una con husillo y dos guías cilíndricas, en el prototipo se seleccionó el mismo mecanismo.

En general, una guía lineal consiste en un sistema de desplazamiento lineal, bien con una entrada rotativa, como por ejemplo un motor, o bien utilizando motores lineales. Lo más habitual es utilizar sistemas lineales formados por uno o dos elementos que dirigen el movimiento y un sistema de desplazamiento del elemento principal, que habitualmente es algún tipo de carro. La mayoría de los mecanismos con entrada rotativa desarrollados comercialmente son sistemas de husillo con una tuerca unida al carro o sistemas de correas y polea.

Este último permite adquirir velocidades mayores, aunque transmite menor fuerza y no dispone de un sistema que permita retener el conjunto, por lo que los motores siempre tienen que estar energizados para que no se desplace de su sitio. Además, si no se tensa la correa como es correcto es probable llegar a tener problemas de precisión y elongamientos. Con el husillo además se tiene mayor resolución, a no ser que el sistema de correa cuente con una gran resolución en el motor.

La gran ventaja de un sistema de correas son los costes y la menor cantidad de problemas mecánicos. Un husillo ha de estar sujeto por al menos un rodamiento en alguna de sus partes, y estos han de mantenerse bien engrasados si se quiere alargar su vida útil. Además, la correcta alineación de las guías cilíndricas entre ellas y con el husillo es fundamental para evitar bloqueos del conjunto. Asimismo, los costes iniciales de una guía con husillo son mucho más elevados que con correas.

En esta aplicación no se necesitan ni grandes velocidades ni precisiones, ya que, de las tres grandes aplicaciones en las que se puede dividir el amolado, esta correspondería a una intermedia entre desgaste y precisión. Atendiendo en este caso a los costes, la mejor alternativa parecen ser las correas. Sin embargo, la elección no se debe solamente a que el diseño final se utiliza un husillo; se trata de desplazar una herramienta mecanizando una superficie, donde entrarán en juego fuerzas de fricción y de reacción, por lo que es importante que la transmisión de fuerza en el conjunto de desplazamiento sea buena, lo que se puede conseguir mejor con un husillo que con correas.

2.4.1. GUÍA

La guía seleccionada es un modelo de la marca Igus, la drylin SHT-20-AWM-750 [23]. El último número de la referencia representa la carrera máxima.

Las características técnicas de la guía son:

Referencia	Carrera máx. [mm]	Ejes de aluminio		Ejes de acero		Máx. capacidad de carga estática	
		Peso [kg]	Adicional (por cada 100 mm) [kg]	Peso [kg]	Adicional (por cada 100 mm) [kg]	Axial [N]	Radial [N]
SHT-20-AWM	1.000	3,2	0,3	3,9	0,6	1.600	6.400

Tabla 2.15. Datos técnicos de la guía lineal.

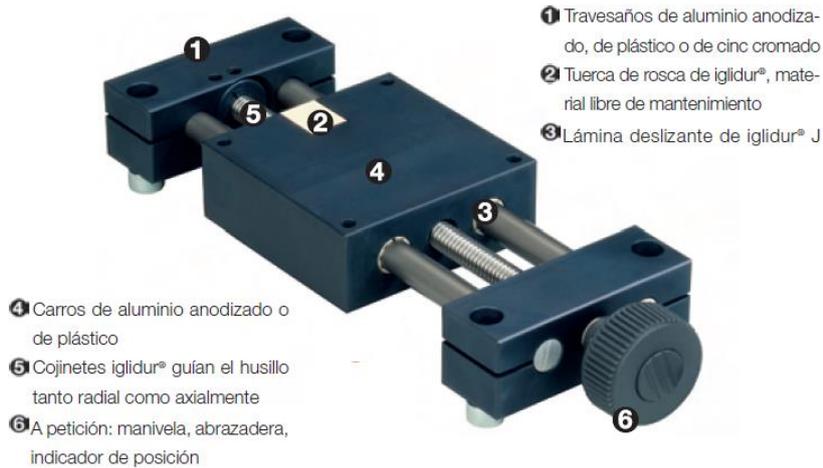


Figura 2.17. Elementos que conforman la drylin SHT-20-AWM.

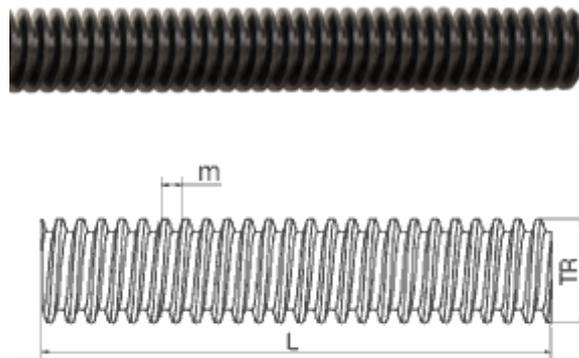


Figura 2.18. Datos del husillo: TR corresponde al diámetro externo, m al paso y L a la longitud total.

El husillo tiene una referencia TR18x4, lo que significa que es de rosca trapezoidal, con un diámetro externo de 18 mm y un paso de 4. Esto último significa que por cada vuelta que dé el husillo, el carro se desplazará 4 mm.

Las gráficas de funcionamiento de la guía, que relacionan velocidades y cargas, para un desplazamiento horizontal se presentan a continuación. La máxima velocidad lineal recomendada es de 1 m/min. La gráfica roja es la que se corresponde al husillo TR18x4.

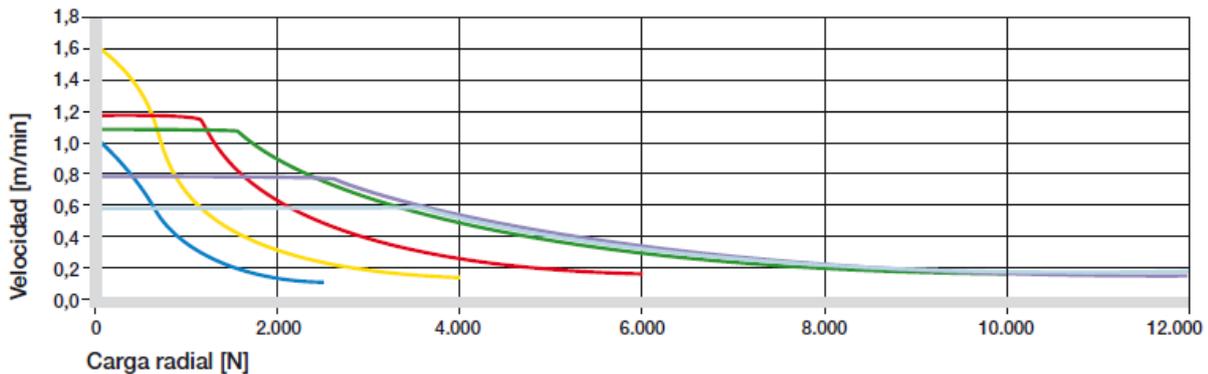


Figura 2.19. Velocidad de avance del carro máxima en m/min en función de la carga.

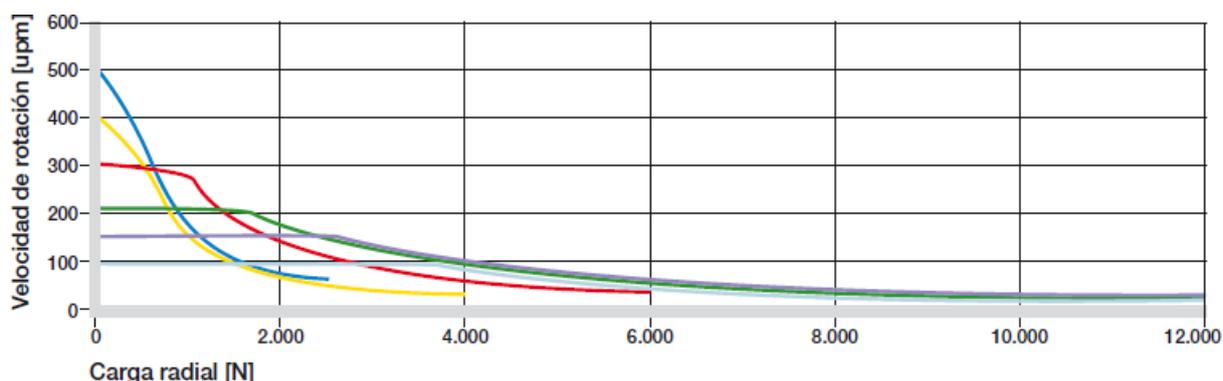


Figura 2.20. Velocidad de rotación máxima en rpm en función de la carga.

La guía ha de cargar con el peso del cilindro eléctrico, la Dremel y los elementos de sujeción, además de tener que soportar la fuerza de reacción del proceso. No obstante, en ningún momento se alcanzarán 1600 N por lo que sería posible trabajar a máxima velocidad tanto de desplazamiento como de rotación.

2.4.2. ACCIONAMIENTO

La entrada de la guía es un motor de la compañía Trinamic Motion Control, con referencia QSH5718-51-28-101 [24]. Se trata de un motor paso a paso, de 200 pasos por vuelta, con un par de 1.01 Nm.

Specifications	Parameter	Units	QSH5718
			-51-28-101
Number of Leads		N°	4
Step Angle		°	1.8
Step Angle Accuracy		%	5
Rated Voltage	V_{RATED}	V	2.3
Rated Phase Current	$I_{RMS RATED}$	A	2.8
Phase Resistance at 20°C	R_{COIL}	Ω	0.83
Phase Inductance (typ.)		mH	2.2
Holding Torque		Nm	1.01
Detent Torque		Nm	0.035
Rotor Inertia		$g\ cm^2$	275
Insulation Class			B
Max. applicable voltage		V	75
Max. radial force (20mm from front flange)		N	75
Max. axial force		N	15
Weight		kg	0.65
Length		mm	51
Temp. Rise (rated current, 2 phase on)		°C	+80 max
Ambient Temperature		°C	-20 +50

Tabla 2.16. Datos técnicos del motor.

Viene con una placa de control incorporada, desarrollada por la misma empresa. El conjunto tiene como número de referencia PD57-2-1161 [25]. Este controlador permite alcanzar una resolución de 256 micropasos en el movimiento de motor.

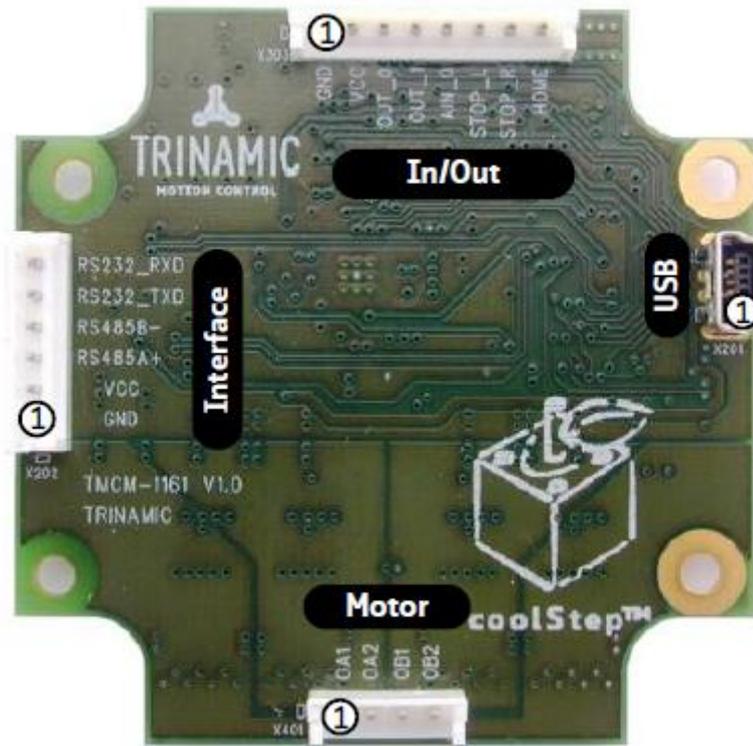


Figura 2.21. Conexiones del controlador del motor.

Además de las conexiones de comunicaciones, cuenta con un conjunto de entradas y salidas digitales y analógicas para la inclusión de otros dispositivos, como por ejemplo finales de carrera.

El controlador ha de alimentarse a 24 VDC. Es recomendable conectar un condensador electrolítico de suficiente capacidad a las líneas de alimentación. Esto se hace con el fin de estabilizar la potencia y filtrar la señal. También se reducirán los picos de tensión que podrían ocurrir a causa de una alta inductancia entre los cables de alimentación. Además, limitará la tasa de variación de tensión de la fuente de alimentación. La capacidad del condensador debería ser:

$$c = 1000 \frac{\mu F}{A} * I_{fda} \quad (2.1)$$

Siendo I_{fda} la corriente entregada por la fuente de alimentación, en amperios.

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
VCC	Power supply voltage for operation	10	24	30	V DC
V _{USB}	Power supply via USB connector		5		V
I _{USB}	Current withdrawn from USB supply when USB bus powered (no other supply connected)		40		mA
I _{COIL_peak}	Motor coil current for sine wave peak (chopper regulated, adjustable via software)	0		4	A
I _{COIL_RMS}	Continuous motor current (RMS)	0		2.8	A
I _{SUPPLY}	Power supply current		<< I _{COIL}	1.4 * I _{COIL}	A
T _{ENV}	Environment temperature at rated current (no forced cooling required)	-35 [°]		+50	°C

Tabla 2.17. Valores de operación que puede alcanzar el PD57-2-1161.

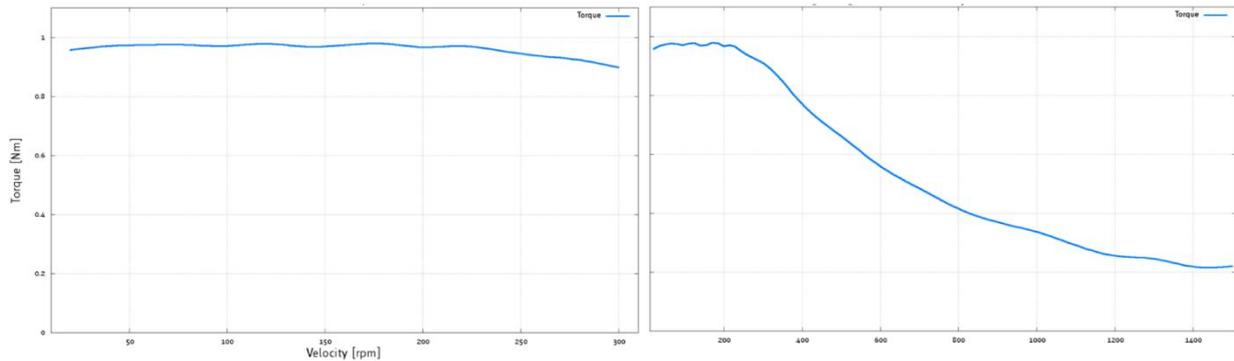


Figura 2.22. Curvas par-velocidad del motor, con el controlador alimentado a 24 VDC, 2.8 A y una división de 256 micropasos.

Los parámetros de velocidad que se le pasan al controlador del motor no equivalen a valores típicos de un motor, como por ejemplo rpm. Sin embargo, es posible hacer un cálculo a partir de una serie de variables que definen el funcionamiento del controlador.

Signal	Description	Range
f_{CLK}	clock-frequency	16 MHz
velocity	-	0... 2047
a_max	maximum acceleration	0... 2047
pulse_div	divider for the velocity. The higher the value is, the less is the maximum velocity default value = 0	0... 13
ramp_div	divider for the acceleration. The higher the value is, the less is the maximum acceleration default value = 0	0... 13
Usrs	microstep-resolution (microsteps per fullstep = 2^{Usrs})	0... 8

Tabla 2.18. Parámetros del PD57-2-1161.

La frecuencia de micropasos (usf) del motor, medida en Hertzios (Hz) viene definida por la siguiente ecuación:

$$usf = \frac{f_{clk} * velocity}{2^{pulse_div} * 2048 * 32} \quad (2.2)$$

Para calcular la frecuencia de paso completo (fsf), en Hz, a partir de la ecuación 2.2 es necesario conocer a cuántos micropasos por paso está trabajando el motor.

$$fsf = \frac{usf}{2^{Usrs}} \quad (2.3)$$

Para conocer las vueltas por minuto (rpm) del motor solo es necesario conocer cuántos pasos por vuelta tiene el motor, en este caso 200:

$$rpm = \frac{fsf * 60}{pasos \ por \ rotación} = \frac{fsf * 60}{200} = fsf * 0,3 \quad (2.4)$$

Agrupando todas las ecuaciones anteriores, a partir de los parámetros de la Tabla 2.18, se calculan las vueltas de salida por minuto del motor, lo que permitirá además calcular el desplazamiento del carro en el husillo:

$$rpm = \frac{f_{clk} * velocity}{2^{pulse_div} * 2048 * 32} * 0,3 \quad (2.5)$$

$$L = p * rpm \quad (2.6)$$

Siendo L la longitud desplazada por el carro por minuto y p el paso del husillo.

2.4.3. CONTROL

La referencia del controlador independiente es TMCM-1161 [26]. El TMCM-1161 es un módulo controlador para motores paso a paso bipolares de 2 fases. Diseñado para colocar en la parte posterior de los motores paso a paso NEMA 23 o NEMA 24 y para corrientes de bobina de hasta 2.8 A RMS y hasta 24 V CC de tensión de alimentación.

Utiliza como software de programación el Trinamic Motion Control Language (TMCL), el cual proporciona un conjunto de comandos de control de movimiento estructurado, y permite dos modos de operación: un modo de operación independiente, es decir, modo autónomo; y el control de modo directo, o funcionamiento en control remoto a través de USB, RS232 o RS485. En esta aplicación se utiliza USB.

La ejecución del programa TMCL independiente es posible utilizando el TMCL-IDE (IDE = entorno de desarrollo integrado) para el desarrollo del código y después almacenando dicho código en la memoria del módulo.

Cada comando de control de movimiento puede ser almacenado en una EEPROM en el módulo TMCM para formar programas que se ejecutan de forma independiente en el módulo. Para ello no solo existen comandos de control de movimiento sino también comandos para controlar la estructura del programa (como saltos condicionales, comparar y calcular).

El modo directo del TMCL utiliza comandos binarios. En modo directo, la comunicación TMCL a través de RS-232, RS-485, CAN y USB sigue una estricta relación maestro / esclavo. Es decir, una computadora host (por ejemplo, PC / PLC) que actúa como interfaz de bus maestro enviará un comando al TMCM-1161. El intérprete de TMCL en el módulo interpretará este comando, realizará la inicialización del controlador de movimiento, leerá las entradas y escribirá las salidas o lo que sea necesario de acuerdo con el comando especificado.

Tan pronto como se haya realizado este paso, el módulo enviará una respuesta a través de la interfaz al bus maestro. Sólo entonces el maestro debe transferir el siguiente comando. Normalmente, el módulo solo cambiará a transmisión y ocupará el bus para una respuesta, de lo contrario permanecerá en modo de recepción. No enviará ningún dato a través de la interfaz sin recibir primero un comando. De esta manera, se evitará cualquier colisión en el bus cuando haya más de dos nodos conectados a un solo bus.

Cada comando tiene una representación binaria y un mnemónico. El formato binario se utiliza para enviar comandos desde el host a un módulo en modo directo, mientras que el formato mnemónico se utiliza para facilitar el uso de los comandos al desarrollar aplicaciones TMCL independientes utilizando el TMCL-IDE.

Cuando se envían comandos desde un host a un módulo en formato binario, cada comando consta de un campo de comando de un byte (8 bits), un campo de tipo de un byte, un campo de

motor/banco de un byte y un campo de valor de cuatro bytes. Así que la representación binaria de un comando siempre tiene siete bytes.

Cuando se debe enviar un comando a través de la interfaz USB, tiene que incluirse un byte de dirección al principio y un byte de suma de comprobación al final. Este último se calcula sumando todos los bytes (incluido el byte de dirección del módulo) mediante una suma de 8 bits Finalmente, el comando consta de nueve bytes.

Número de bytes	Significado
1	Dirección del módulo
1	Número del comando
1	Número del tipo del comando
1	Número del motor o del banco de memoria
4	Valor
1	Suma de comprobación

Tabla 2.19. Array de bytes de un comando para enviar al motor.

Es importante no enviar ningún otro comando hasta haber recibido la trama de respuesta.

Número de bytes	Significado
1	Dirección de la respuesta
1	Dirección del módulo
1	Código de estatus
1	Número del comando
4	Valor
1	Suma de comprobación

Tabla 2.20. Array de bytes de un comando recibido del motor.

Código de estatus	Significado
100	Ejecución correcta, sin errores
101	Comando cargado en la EEPROM
1	Suma de comprobación errónea
2	Comando no válido
3	Tipo no válido
4	Valor no válido
5	Configuración de la EEPROM bloqueada
6	Comando no disponible

Tabla 2.21. Códigos de estatus del motor.

Para establecer la comunicación USB se utilizan las clases *QSerialPort* y *QSerialPortInfo* del entorno de programación Qt, en el que se realiza toda la programación de las funcionalidades del prototipo utilizando el lenguaje C++ [27].

Inicialmente se comprueban todos los puertos USB del PC. El que reconozca un dispositivo con la denominación de TRINAMIC en sus características será el puerto que se defina para las comunicaciones.

A continuación, se define el *baudrate*, o el número de unidades de señal por segundo, en este controlador 9600; el número de bits que conforman cada dato enviado en la comunicación, en este caso 8; y si hay bit de stop y bit de paridad.

La comunicación serie funciona de manera similar a una escritura de archivos. Lo primero es abrir la comunicación, y puede ser en modo solo lectura, solo escritura o ambas. Una vez se tenga el array del comando a enviar, se “escribe” el mensaje, se espera a que se escriban todos los bytes, se espera a que se reciban todos los bytes de respuesta y se lee el mensaje de vuelta. Cuando no sea necesario seguir comunicándose con el interlocutor, se cierra la comunicación.

2.5. Prototipo: ordenador central

A la hora de elegir un sistema central de procesamiento, para poder llevar a cabo correctamente todas las funcionalidades que ha de tener el prototipo, es fundamental seleccionar aquel que se adapte mejor a las necesidades específicas del proyecto, con un procesador adecuado, puertos de conexión suficientes y que no tenga un coste excesivo.

Para cumplir con todas estas funcionalidades existen los ordenadores de placa única (SBC). Estos integran un microprocesador, una memoria RAM y diversos puertos de entradas y salidas en una sola placa compacta, que funciona a modo de placa base de un ordenador. Se utilizan principalmente en sistemas embebidos o en entornos industriales para el control de procesos automáticos o de máquinas.

En el mercado existe una gran diversidad de SBC. A continuación se presenta una comparativa entre los principales modelos de placas más utilizados hoy en día [28].

	Beaglebone Black, Rev. C	Raspberry Pi 3 B+	ODROID-XU4	Arduino TRE
Fabricante	Texas Instruments AM3358/9	Broadcom BCM2837B0	Samsung Exynos-5422	Texas Instruments AM335x
CPU	ARM Cortex-A8 (32-bit) 1GHz un núcleo	ARM Cortex-A53 (64-bit) 1.4GHz cuatro núcleos	ARM Cortex-A15 / ARM Cortex-A7 (32-bit) 2GHz ocho núcleos	ARM Cortex-A8 (32-bit) 1GHz un núcleo
Tamaño de RAM	512 MB	1 GB	2 GB	512 MB
RAM incorporada	SI	SI	SI	SI

Almacenamiento interno	4GB	-	-	-
Almacenamiento extraíble	MicroSD	MicroSD	MicroSD	MicroSD
Puertos USB	1	4	3	4
Ethernet	1 puerto Tipo: 10/100	1 puerto Tipo: Gigabit	1 puerto Tipo: Gigabit	1 puerto Tipo: 10/100
HDMI	SI	SI	SI	SI
VGA	NO	NO	NO	NO
Vídeo compuesto (CVBS)	NO	SI	NO	NO
Interfaz de displays	NO	DSI, combo 3.5mm A/V jack	NO	NO
Interfaz de cámara	NO	1	NO	NO
Salida de audio	NO	SI	NO	SI
Conector de audio	NO	Jack de 3.5mm	NO	Jack de 3.5mm
WiFi	NO	802.11b/g/n/ac	NO	NO
Bluetooth	NO	Bluetooth BLE 4.2	NO	NO
Pines GPIO	92	40	30	12

Pines PWM	NO	1	NO	1
Pines ADC	NO	NO	SI	SI
I2C	NO	1	1	NO
SPI	NO	1	1	NO
UART	NO	1	2	NO
RS232/485/422	NO	NO	NO	NO
Tensión de alimentación	5V	4.8V - 5.2V	4.8V - 5.1V	5V
Corriente de alimentación	600mA - 1.4A	600mA - 2.4A	1A - 4A	600mA - 2A
Soporte Linux	SI	SI	Si	SI
Soporte Android	Android 4.4	NO	Android 4.4	Android 4.4 (beta)
Soporte Windows	NO	Windows 10 IoT Core	NO	NO
Price	\$45	\$35	\$74	~ \$30

Tabla 2.22. Comparativa SBC más utilizadas.

Para el prototipo se necesita al menos un puerto USB para la comunicación con el motor, y pines de salida para poder dar pulsos que activen la herramienta y la entrada del PLC. En base a estas especificaciones cualquiera de las 4 SBC de la tabla anterior sería válida.

En lo relativo al procesamiento y memoria, de las cuatro destacan la Raspberry Pi 3 B+ y la ODROID-XU4.

Por otro lado, la Raspberry dispone de funcionalidades tanto gráficas como de audio, que aunque para esta aplicación no sean necesarias, si se quieren implementar mejoras en el prototipo o añadirle utilidades, es una ventaja disponer de ellas.

Además, en las Raspberry se puede utilizar ROS Kinetic para poder implementar en ellas un nodo de ROS que facilite la integración del prototipo con la base móvil y otros módulos.

Por último, mencionar la diferencia de coste entre ambas, pues el de la Raspberry es mucho menor.

2.5.1. RASPBERRY PI 3 B+

El sistema operativo que se utiliza en el ordenador está basado en Linux, y el lenguaje de programación para las funcionalidades es C++.

Las Raspberry se utilizará para tres tareas: encender y apagar la herramienta; dar la orden al cilindro de ejecutar un ciclo de trabajo, ya sea de extensión o de recogida del vástago; comunicarse con el motor.

Para la última tarea solamente es necesario utilizar uno de los puertos USB de que dispone. Para llevar a cabo las otras dos hay que utilizar los pines GPIO.

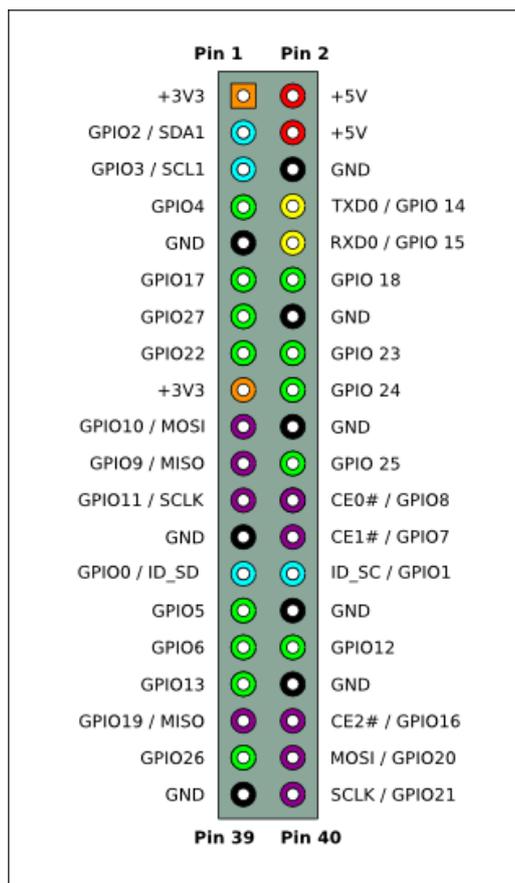


Figura 2.23. Pines GPIO de la Raspberry 3 B+.

El lenguaje de programación de entradas y salidas de la Raspberry más utilizado es Python. No obstante, hay varias formas de comunicarse con los pines de la Raspberry desde Qt empleando C++.

Existen librerías destinadas a integrar los diferentes lenguajes de programación para poder utilizar de manera sencilla e intuitiva los pines de la placa. Un ejemplo de ello es *WiringPi* [29]. Esta es una librería para acceder al GPIO desde C, C++ y RTB (BASIC), así como en muchos otros idiomas alternativos. Está diseñado para aquellos familiarizados con el sistema de conexiones de Arduino1 y para ser utilizado por programadores experimentados, no es recomendable para principiantes.

Otro ejemplo es el *Pi4J Project* [30]. El objetivo de este proyecto es proporcionar una interfaz de entradas y salidas orientada a objetos y diversas bibliotecas para programadores de Java, de forma que estos puedan acceder a todas las capacidades de la Raspberry Pi.

En este caso se ha optado por realizar un acceso directo a las características de los pines GPIO, trabajando con ellos como si fuesen directorios. En las Raspberry existe una carpeta, generalmente con la dirección “/sys/class/gpio” con un archivo que al ejecutarlo permite exportar la información de cualquiera de los pines de la placa. Dentro de esta información se encuentra la dirección con la que se puede acceder a dicho pin y el valor que tiene este actualmente.

Trabajar con estos datos es similar a trabajar con archivos, por lo que habrá que abrir el fichero, definiendo si es de lectura o escritura, es decir, entrada o salida; escribir en él lo que se quiera, es decir, modificar su valor; y por último volver a cerrar el documento.

En la carpeta mencionada anteriormente existe también un ejecutable para eliminar la información importada de cada pin. Es recomendable utilizarlo al terminar de manejar los pines en la placa.

El código implementado se encuentra en los anexos del proyecto.

2.6. Prototipo: circuitos extra

Para poder utilizar la Raspberry como mecanismo de encendido y apagado de la herramienta y como señal de activación del PLC es necesario utilizar circuitos intermedios.

2.6.1. CONEXIÓN/DESCONEXIÓN DE LA HERRAMIENTA

El interruptor original de la Dremel es un simple final de carrera, con un contacto normalmente abierto (NA) conectado a tensión positiva de la batería; un contacto normalmente cerrado (NC) conectado a tensión negativa y a uno de los bornes del motor; y un contacto común (COM), conectado al otro borne del motor.

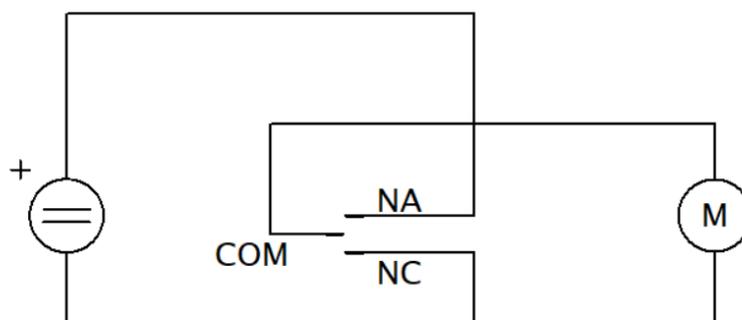


Figura 2.24. Circuito interno Dremel.

De esta forma, inicialmente están unidos COM y NC, por lo que no llegará corriente al motor y no podrá moverse. Al presionar el final de carrera pasarán a estar unidos COM y NA, conectando cada uno de los bornes del motor a un borne de la fuente de alimentación y provocando que este empiece a moverse.

Es necesario eliminar el pulsador, ya que hay que activarlo físicamente y se quiere hacer de forma remota.

Una primera opción podría ser utilizar un transistor directamente, haciéndolo funcionar como un interruptor eléctrico. No obstante, la Dremel trabaja con elevadas corrientes, de hasta 10 A, y un transistor no permite aislar eléctricamente la entrada de la salida por lo que se podría dañar la Raspberry.

Otra alternativa es utilizar un optoacoplador. Este funciona mediante un diodo LED, que se ilumina y activa un fototransistor que hace de interruptor. La entrada y la salida están completamente aisladas, por lo que no habría posibilidad de estropear alguno de los pines de la placa. No obstante, las corrientes que admite el fototransistor son bajas, por lo que no sería capaz de soportar la circulación de corriente que necesita el motor de la herramienta.

La última opción, y la que se ha implementado, es el uso de un relé. Consiste en una bobina a través de la cual se hace circular corriente, induciendo un campo magnético y provocando el desplazamiento de un contacto de salida de una posición a otra. La bobina de entrada y los contactos de salida están totalmente aislados. El principal problema de este sistema es que puede dar problemas mecánicos, ya que es un contacto físico entre terminales; no obstante, soporta grandes corrientes y es la mejor alternativa en esta aplicación.

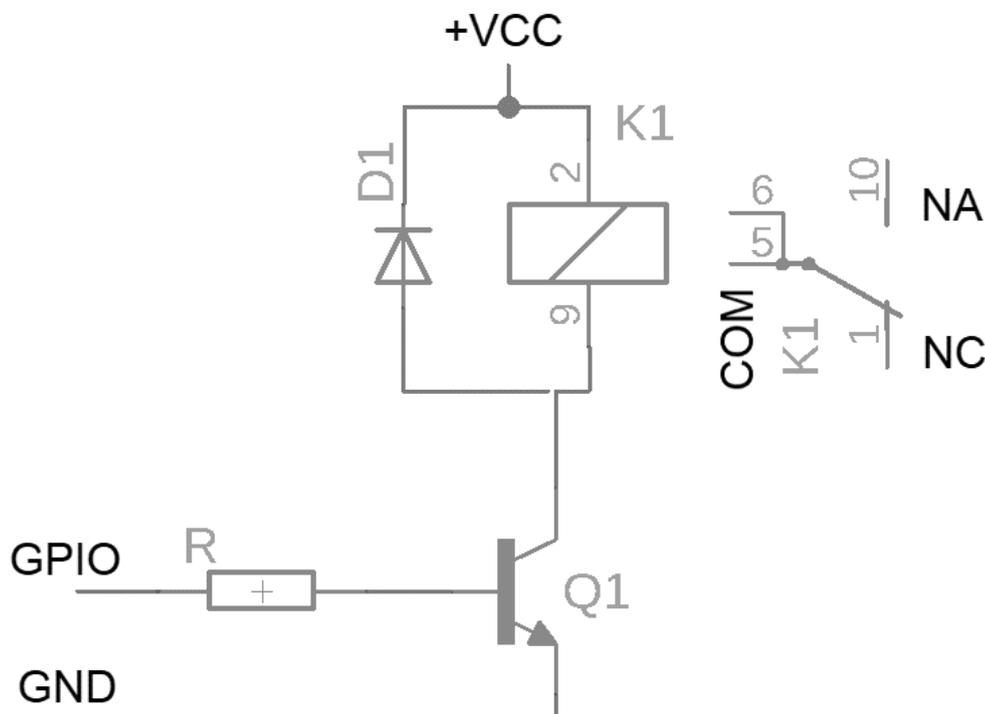


Figura 2.25. Circuito para el relé.

K1 representa el relé. D1 es un diodo de libre circulación, para que cuando se corte la tensión desde el GPIO la corriente pueda seguir circulando y disipándose lentamente por la bobina, y no se corte bruscamente, estropeando el circuito. Para asegurar que por el relé pueda circular corriente

suficiente, ya que por los pines de la Raspberry solo pueden circular como máximo 16 mA, se utiliza un transistor, Q1, para amplificar dicha corriente.

Existen circuitos de este tipo comerciales, para utilizar fundamentalmente con Raspberry o con Arduino. Se ha seleccionado uno de ellos, capaz de soportar en los contactos de salida la corriente que requiere el motor de la herramienta.

El modelo de la placa del relé es de la compañía *Parallax*, con referencia de producto *Singe Relay Board 27115* [31]. Permite controlar dispositivos de alta potencia de hasta 10 A. Dispone de tres pines de entrada, uno para la conexión al GPIO, otro a un pin de 5 V de la placa y otro a un pin GND. También tiene tres conexiones de salida, NA, NC y COM.

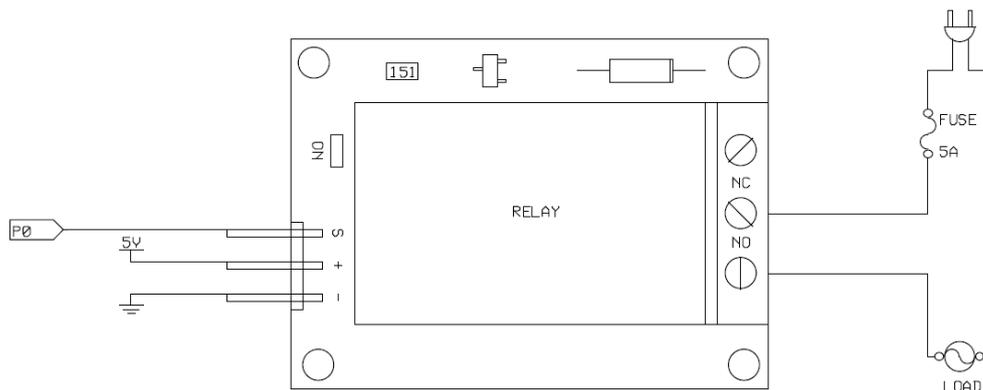


Figura 2.26. Ejemplo de conexión del circuito del relé.

Interiormente lleva un circuito similar al de la Figura 2.25. La gran diferencia es que entre el pin de la placa y el transistor se incluye un optoacoplador para tener un doble aislamiento del circuito y evitar que la bobina del relé pueda dañar el pin.

2.6.2. SEÑAL AL PLC

Para dar una señal al PLC es necesario tener 24 V. La tensión de salida de la Raspberry es de 3.3 V y 16 mA como máximo, por lo que es necesario utilizar un circuito intermedio que modifique estos valores. En este caso, a la salida no se requieren grandes corrientes, por lo que es posible utilizar un optoacoplador como forma de aislar eléctricamente los circuitos de entrada y salida.

El funcionamiento de un optoacoplador consiste en hacer circular corriente por la entrada, de forma que se enciende un LED, este ilumina un fototransistor y activa la salida. La salida del optoacoplador puede estar conectada a la tensión de referencia que se quiera, dentro de los parámetros máximos del componente. La referencia del integrado elegido es HCPL-3120 [32].

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units
Power Supply Voltage	$(V_{CC} - V_{EE})$	15	30	Volts
Input Current (ON)	HCPL-3120	$I_{F(ON)}$	7	mA
	HCPL-J312		7	
	HCNW3120		10	
Input Voltage (OFF)	$V_{F(OFF)}$	-3.6	0.8	V
Operating Temperature	T_A	-40	100	°C

Tabla 2.23. Condiciones de operación recomendadas.

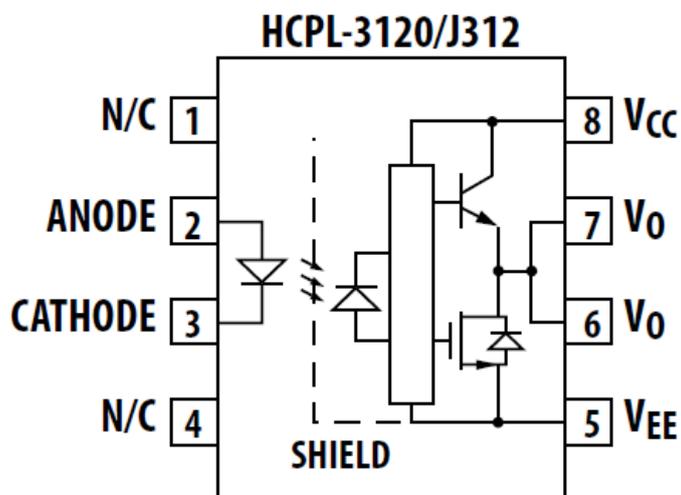


Figura 2.27. Pines del HCPL-3120.

En la figura anterior, el pin 2 se conecta a GPIO en la placa de la Raspberry; el pin 3 a GND; el pin 8 a tensión positiva en el PLC; el pin 5 a tensión de referencia en el PLC; y por último los pines 6 y 7 están unidos interiormente, por lo que cualquiera de ellos se conecta a la entrada del PLC correspondiente.

Entre Vcc y Vee a la salida del optoacoplador se recomienda colocar un condensador de al menos 0.1 μF para estabilizar la señal.

Se ha diseñado una placa de circuito impreso (PCB) para incorporar al circuito pines de entrada y conectores de salida, así como una resistencia y el condensador.

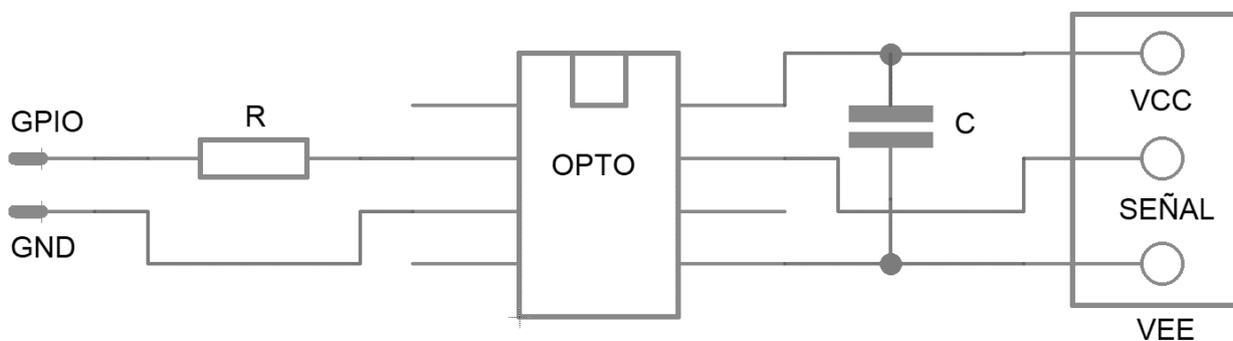


Figura 2.28. Circuito para el optoacoplador.

Como hay dos referencias de tensión diferentes en el circuito, a la hora de diseñar la PCB es importante tener una buena separación de planos de masa, conectados a las correspondientes referencias, para que haya un aislamiento eléctrico adecuado entre ellas y a su vez para reducir ruidos.

En la página siguiente se puede ver en la imagen superior esa separación entre los planos de masa, de unos 2 mm de distancia. El tamaño total de la placa es de 30x23 mm.

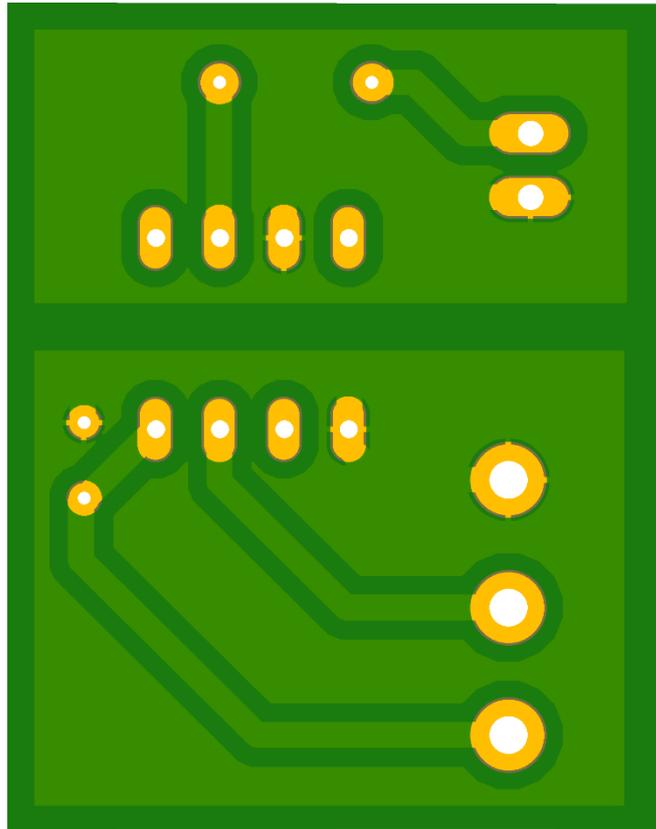


Figura 2.29. Parte inferior de la PCB.

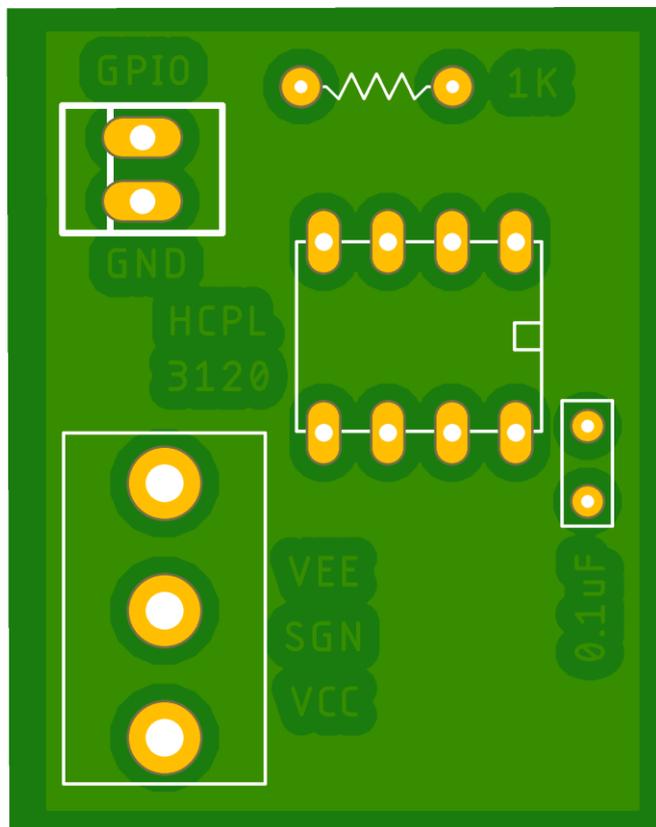


Figura 2.30. Parte superior de la PCB.

2.7. Prototipo: alimentación.

Como no es necesario que el prototipo completo se desplace, la potencia al sistema se la suministrará una fuente de alimentación de 24 V y 504 W. La única parte del circuito que trabaja a 12 V es la herramienta, que ya lleva su propia batería incorporada.

No obstante, si se necesitase desconectar de la red eléctrica, sería necesario calcular una batería apropiada.

	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Herramienta	-	-	175
PC	5	0.33	1.7
PD-1161	24	2.8	67,2
Relé	5	0.085	0.425
Optoacoplador	24	2,5	84
Controlador cilindro	24	3	72
Cilindro	-	-	5
PLC	-	-	18.5

Tabla 2.24. Tabla de consumos de potencia.

Todos los datos han sido extraídos de las correspondientes hojas de características de los componentes, siendo en todos los casos valores nominales de tensiones, máximos de corrientes y máximos de potencia consumida.

En total la potencia máxima que podrían llegar a consumir todos los elementos del circuito trabajando a la vez es de 423.825 W. Sería necesario tener o dos baterías diferentes, una para los circuitos de 5 V y otra para los de 24, o una sola de 24 y algún circuito intermedio de adaptación de señales.

3. MONTAJE FINAL DEL PROTOTIPO

Para unir los componentes del prototipo entre si fue necesario diseñar y fabricar varias piezas sencillas, hechas con aluminio y prototipado aditivo. Los planos se estas se encuentran en los anexos.

Los materiales de partida fueron una chapa de aluminio de 1 mm de espesor, para colocar todos los componentes electrónicos; un bloque de aluminio de 150x200x20 mm para unir el carro de la guía con al cilindro; un bloque de aluminio de 100x100x12 para separar la Dremel del cilindro y evitar choques; plástico PLA para la impresión en 3D de dos piezas para la sujeción de la herramienta. El resto del prototipo lo componen perfiles normalizados de aluminio, de diferentes dimensiones, que se listarán más adelante.

Para el diseño con la pieza de chapa se tuvieron en cuenta las restricciones estudiadas en la asignatura de “Fabricación de Productos en Serie” del segundo año del Máster en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Oviedo [33]. Principalmente se aplicó la norma de que el diámetro y la distancia entre agujeros y de estos a los bordes ha de ser al menos del doble del espesor de la misma.

Elemento	Valor numérico	Comentario
Paredes con apoyo	0.8 mm	Paredes conectadas al resto de la impresión en dos o más lados
Paredes sin apoyo	0.8 mm	Muros conectados al resto de la impresión en menos de dos lados
Soportes y salientes	45 °	Máximo ángulo que puede tener una pared sin ser impresa sin soportes
Relieves y grabados	0.6 mm ancho 2 mm alto	Geometrías de l piezas salientes o empotradas con respecto a su superficie
Puentes	10 mm	El vano que puede ser impreso sin necesidad de usar soportes
Orificios	2 mm	Diámetro mínimo de un agujero capaz de ser impreso
Partes móviles	0.5 mm	Holgura recomendada entre dos piezas interconectadas o móviles entre sí
Geometrías mínimas	2 mm	Tamaño mínimo recomendado para una geometría para imprimirse correctamente
Diámetro de pernos	3 mm	Diámetro mínimo que debe tener un perno para poder ser impreso
Tolerancias mínimas	$\pm 0.5 \%$ $\pm 0.5 \text{ mm}$ mínimo	La tolerancia o exactitud dimensional entre piezas unidas

Tabla 3.1. Valores mínimos de diseño para piezas impresas en 3D.

Para el diseño de las piezas realizadas mediante fabricación aditiva se tuvo en cuenta la información de la tabla anterior [34].

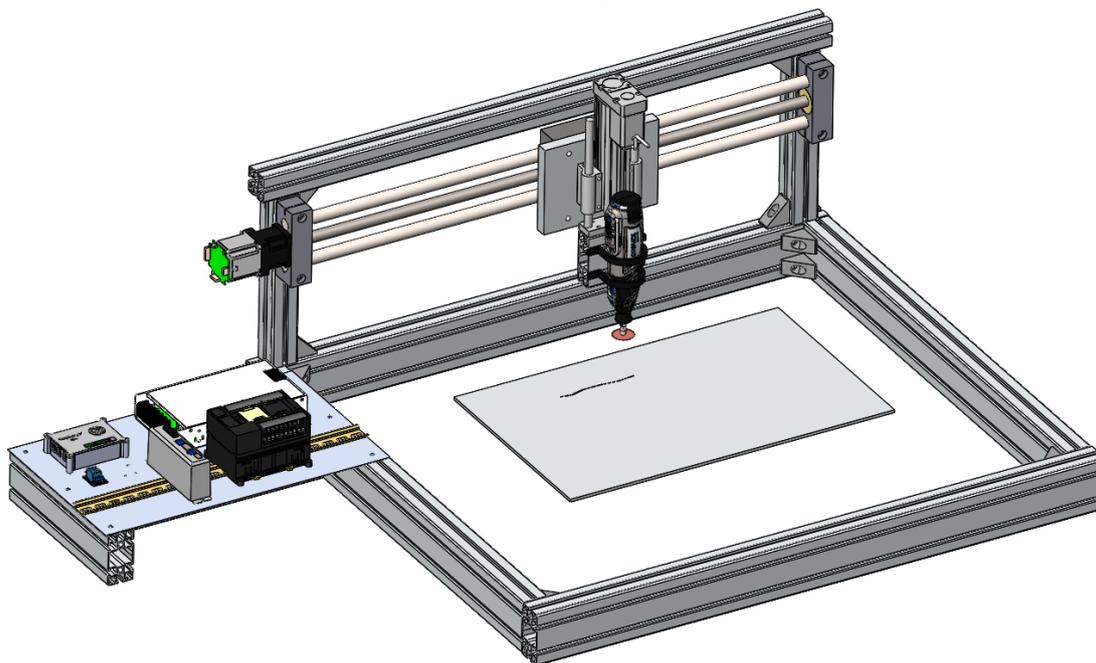


Figura 3.1. Diseño en 3D con el software SolidWorks del prototipo.

Fabricante	Elemento	Referencia	Dimensiones (mm)	Longitud (mm)	Cantidad
Norcan	Perfil aluminio	N0166	90x45	1000	2
Norcan	Perfil aluminio	N0166	90x45	800	2
Norcan	Perfil aluminio	N0166	90x45	407	1
Norcan	Perfil aluminio	N0166	90x45	300	1
Norcan	Perfil aluminio	N0165	45x45	1000	1
Norcan	Perfil aluminio	N0165	45x45	300	2
Norcan	Escuadra	N1105	40x25	-	16

Tabla 3.2. Perfiles de aluminio que conforman el prototipo.

3.1. Montaje físico

Todas las piezas de aluminio fueron mecanizadas con un taladro de columna. Las piezas de plástico fueron fabricadas en una impresora 3D *Ender Creality*.

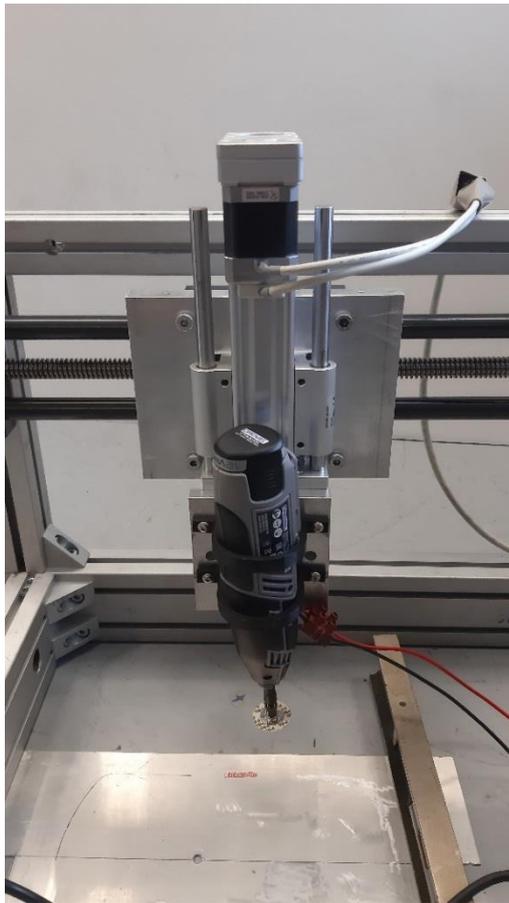


Figura 3.2. Vista frontal del montaje del cilindro y la herramienta.

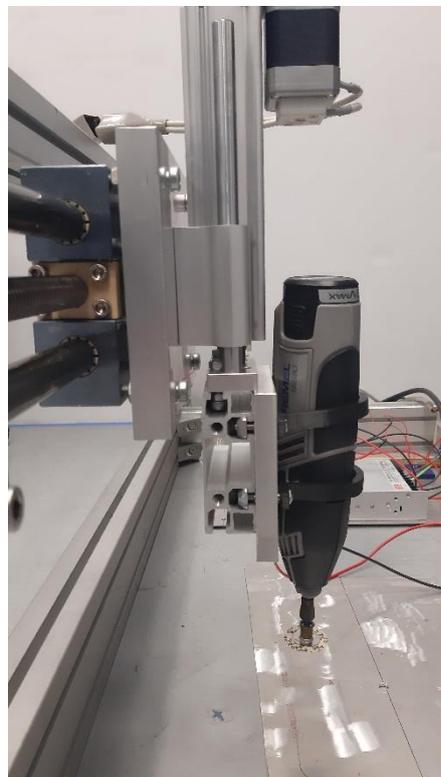


Figura 3.3. Vista lateral del montaje del cilindro y la herramienta.

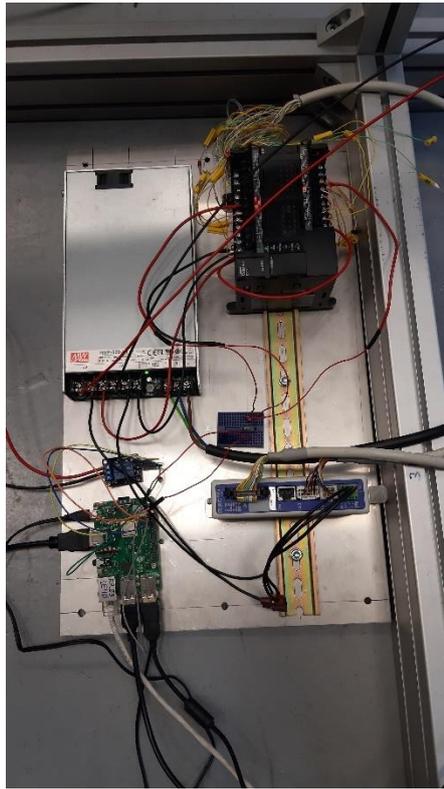


Figura 3.4. Montaje de la electrónica.

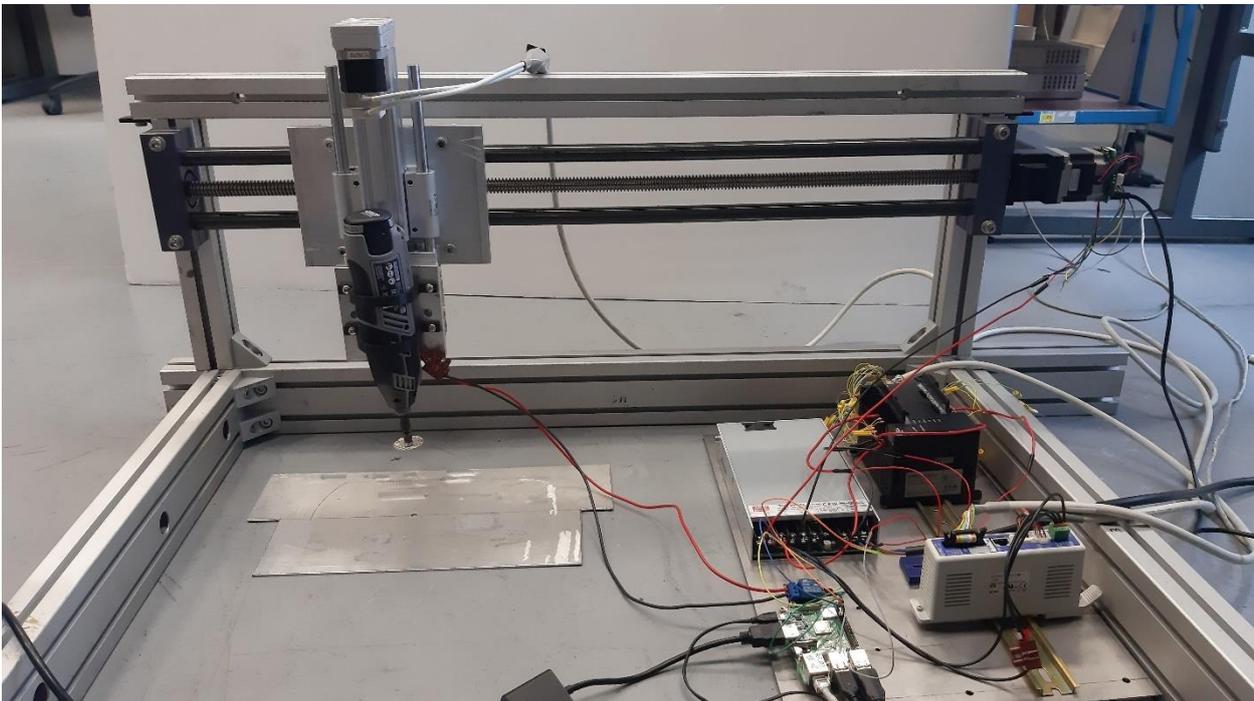


Figura 3.5. Prototipo completo.

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

A la hora de llevar a cabo los experimentos, lo primero que se hizo fue probar de manera independiente todos los subsistemas, y posteriormente unirlos todos hasta formar el prototipo global.

Inicialmente se comprobó que la comunicación USB con el motor se realizase correctamente. Esta se lleva a cabo a través de un script de código en lenguaje C++, ejecutado desde la aplicación de Qt. Se hizo una depuración paso a paso, comprobando que el formato de los arrays de datos y los mensajes de respuesta del motor fueran correctos. Además, en el código se incluyó un sistema de logs, de forma que si se produce algún error en un punto intermedio de las comunicaciones quede almacenado en un archivo qué es lo que ha ocurrido.

Posteriormente se comprobó el funcionamiento tanto del relé como del circuito del optoacoplador. La Raspberry cuenta con 40 pines, de los cuales 27 son GPIO. Sin embargo, algunos de ellos tienen una doble funcionalidad, como se puede ver en la Figura 2.23, por lo que es recomendable utilizar solo aquellos que son exclusivamente para utilizar como entradas y salidas. Las conexiones se realizaron con los pines 17 y 27, para el relé y el optoacoplador respectivamente.

Para unir el relé a la herramienta se extrajo el final de carrera que funcionaba como interruptor en la Dremel y se sustituyó por cables de salida para llevarlos hasta el circuito. Se comprobó que el relé fuera capaz de soportar tanto las corrientes de arranque como de funcionamiento en mecanizado del motor.

Por último, se conectaron el cilindro y el PLC, para comprobar que los ciclos de trabajo estuvieran correctamente implementados. La programación del PLC en lenguaje *ladder* se puede ver en los anexos.

Una vez montado todo el conjunto, se hicieron pruebas a diferentes porcentajes de fuerza del cilindro: desde el 35% al 65% de fuerza, incrementándolo de 5 en 5. En ninguno de los ensayos el cilindro fue capaz de realizar la operación de recogida del vástago, ya que nunca llegaba a emitir la señal de INP en la extensión de este. Tras esto, se intentó con porcentajes de fuerza entre el 5% y el 35% a los mismos intervalos, obteniendo los mismos resultados.

Tras comprobar que la programación del PLC era correcta, se sustituyó la operación de fuerza por una operación simple de posicionamiento. La distancia entre el extremo de la herramienta y la superficie de la chapa de pruebas se encontraba a 60 mm, de forma que se hicieron pruebas a diferentes distancias, para probar diferentes profundidades.

El disco empleado en las pruebas fue un disco de lijar, de referencia SC411 de la marca Dremel, con un diámetro de 30 mm y una densidad de grano de 60. Este permite 20000 revoluciones por minuto como máximo, por lo que la herramienta se llevó a la posición 15, que equivale a 17000 rpm.

A cada una de las distancias se hicieron 10 repeticiones de las pruebas, para comprobar que el ciclo completo de trabajo del prototipo se realizase correctamente en todo momento y asegurar unos resultados fiables en cada una de ellas.

En el robot real el objetivo es que sea capaz de mecanizar deficiencias superficiales, por lo que en este caso las deformaciones de la chapa se simulaban con marcas de rotulador y se trató de eliminar por completo dichas marcas hasta que quedase una superficie lisa de aluminio.

Distancia de posicionamiento (mm)	Ejecuta el mecanizado	Incidencias
63	Si	Giro del disco ralentizado a causa de la fricción. Mecanizado pobre.
62	Si	Giro del disco ralentizado a causa de la fricción. Mecanizado pobre.
61	Si	Mecanizado correcto de la superficie
60	No	-

Tabla 4.1. Distancias de ensayos.

En la siguiente imagen se puede ver la marca de rotulador y el resultado final tras un mecanizado a 61 mm.



Figura 4.1. Antes del mecanizado.

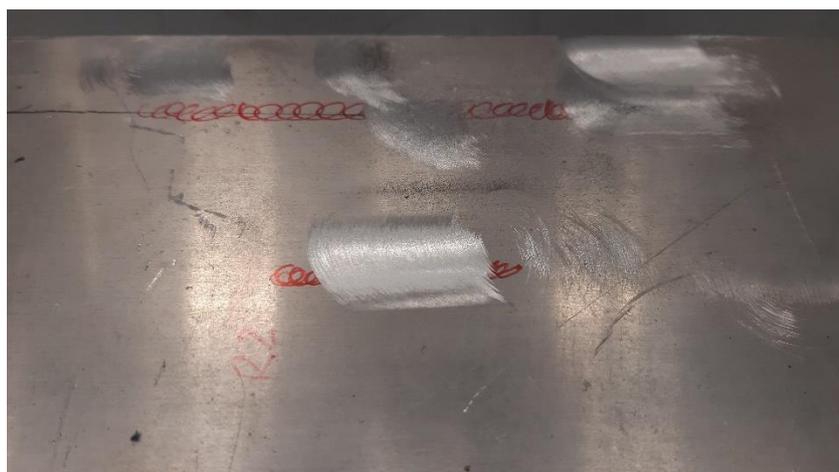


Figura 4.2. Tras el mecanizado.

5. DISCUSIÓN

Por un lado, el hecho de que los ensayos con la operación de fuerza del cilindro eléctrico no dieran resultados positivos se debe a que la fuerza de reacción que genera la Dremel al mecanizar no es elevada.

El actuador para identificar un ciclo de empuje como correcto y enviar la señal INP que indica la finalización de la operación necesita que haya algún tipo de fuerza opuesta a su movimiento. Sino se da el caso de la Figura 2.15 y no se puede completar la acción. La fuerza que general la herramienta al mecanizar la superficie, así como su peso y el de los elementos que la sostienen, no es suficientemente elevada para que el cilindro la identifique como una reacción adecuada y nunca llega a completar la tarea.

No obstante, la fuerza básica que ejerce el vástago en la operación de posicionamiento es constante y suficiente para llevar a cabo el mecanizado de la superficie de la chapa. Como alternativa se podría utilizar un cilindro con menor capacidad de carga, de forma que la reacción al alcanzar la chapa sea suficiente; o una herramienta de mayor potencia con un disco que permita alcanzar mayores revoluciones. Es posible que a la velocidad máxima de la Dremel tampoco hubiera habido fuerza suficiente como para que el cilindro la reconociera, no obstante, las características del elemento abrasivo no permitieron este tipo de pruebas.

Por otro lado, el diseño del robot final permite plantear alguna alternativa. Una es la eliminación de la guía lineal horizontal. El robot es capaz de moverse omnidireccionalmente, por lo que solo es necesario que la herramienta sea capaz de subir y bajar, pues el resto de movimientos, tanto laterales como frontales, podrían ser realizados por la base móvil. De esta forma el centro de gravedad del robot variaría en menor medida que si se utilizase la guía.

Si esta se eliminase habría que valorar la colocación de la herramienta en el conjunto. Tal y como está situada ahora solo permite trabajar por la parte delantera del robot, pero alcanzando cualquier punto de la chapa, incluidas esquinas y bordes. Si se quisiera recolocar habría que posicionarla sobresaliendo lateralmente respecto a las ruedas de la base, sino nunca sería posible alcanzar el punto más extremo de las esquinas sin que el robot tuviera que bajar de la chapa.

Otra alternativa es modificar el sistema neumático que eleva la herramienta. El cilindro que incorpora se utiliza para dos cosas: dar un cierto ángulo de posicionamiento del canto del disco de amolar; y para elevarla y evitar chocar con obstáculos en el suelo. No obstante, actualmente no se incluye ningún tipo de desplazamiento vertical, de forma que el rango de ángulos que permite sin perder el contacto con la chapa o sin una profundidad de mecanizado demasiado elevada, depende del margen de 35 mm de carrera del propio cilindro de la herramienta. Si se utilizase una guía vertical se podría ajustar con mayor precisión el conjunto ángulo-profundidad de mecanizado.

Hay que tener en cuenta que en el diseño realizado por la empresa es un modelo aproximado y habría que valorar los diferentes pesos de los componentes para posicionarlos de forma que el centro de gravedad del robot quede centrado lo máximo posible en el centro de la estructura móvil.

6. CONCLUSIONES

Todos los elementos del conjunto han funcionado correctamente, tanto en pruebas independientes como en la prueba final. La herramienta permite un acabado superficial adecuado sin elevadas fuerzas de reacción; la Raspberry dispone de una memoria y un procesador suficientes para ejecutar correctamente todos los algoritmos; el cilindro proporciona fuerza suficiente para realizar la operación de desbaste; y tanto la guía lineal como el motor tienen unas dimensiones que permiten mover el conjunto con facilidad.

Se puede concluir que se ha podido desarrollar un prototipo a escala y un algoritmo que ejecute un ciclo de mecanizado de superficie de chapa correctamente. El siguiente paso sería probar dicho algoritmo en el robot real.

7. PRESUPUESTO

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA				Pág. MEDICIONES Y PRESUPUESTO			
Nº Orden	Conceptos	Nº Unidades	Fabricante	Precio Unitario Material	Precio Unitario Mano Obra	Precio Unitario Total	Total
1	Herramienta	1	Dremel Europe	150 €	-	150 €	
2	Raspberry Pi 3 B+	1	Raspberry Pi Foundation	30 €	-	30 €	
3	Cilindro eléctrico	1	SMC	500 €	-	500 €	
4	Controlador del cilindro	1	SMC	100 €	-	100 €	
5	PLC	1	Omron	250 €	-	250 €	
6	Fuente de alimentación	1	Mean Well	120 €	-	120 €	
7	Perfil aluminio 90x45	5 m	Norcan	36 €/barra 1 m	-	180 €	
8	Perfil aluminio 45x45	2 m	Norcan	20 €/barra 1m	-	40 €	
9	Escuadra	16	Norcan	6 €	-	96 €	

Diseño de un robot de subsanación de imperfecciones en chapa

10	Electrónica variada	1	-	50 €	-	50 €	
11	Chapa aluminio 1 mm	1	Alustock	14 €, 1 m ² de chapa	-	14 €	
12	Perfil aluminio 20 mm espesor x 150 mm	0.2 m	Alustock	52 €/m	-	10,4 €	
13	Perfil aluminio 12 mm espesor x 100 mm	0.1 m	Alustock	43 €/m	-	4,3 €	
14	Impresión piezas plástico	2 horas	-	8 €/hora máquina (plástico incluido)	-	16 €	
Costes de material						1.560,70 €	
15	Uso taladro vertical	1 hora	-	25 €/hora	-	25 €	
16	Operaciones manuales	0.5 horas	-	10 €/hora	-	5 €	
Costes de uso de maquinaria						30 €	
17	Estudios previos	200 horas	-	-	35 €/hora	7000 €	
18	Diseño	80 horas	-	-	35 €/hora	2800 €	
19	Elaboración del prototipo	100 horas	-	-	35 €/hora	3500 €	

Diseño de un robot de subsanación de imperfecciones en chapa

20	Ensayos	20 horas	-	-	35 €/hora	700 €		
21	Redacción de informes	160 horas	-	-	25 €/hora	4000 €		
							Costes de mano de obra	18.000 €
							Costes totales de ejecución material	19.590,70 €
							Gastos generales y beneficio industrial	3.134,51 €
							Total	22.725,21 €
							IVA 21%	4.772,29 €
							Total, con IVA	27.497,50 €

Notas del presupuesto:

Las operaciones manuales son todas aquellas que impliquen labores no realizadas con una máquina, como eliminación de rebabas, pulido, limpieza, verificación, etc.

Los gastos generales y el beneficio industrial derivan de la utilización de las instalaciones de trabajo más el beneficio industrial. Se estima que equivalen a un porcentaje del 16% sobre los costes totales.

El Importe Total del proyecto suma la cantidad de:

Veintisiete mil trescientos noventa y seis euros con cuarenta y seis céntimos.

Bibliografía

- [1] S. Roos Hoefgeest Toribio. *Localización de un robot autónomo para la inspección y subsanación de imperfecciones en chapa gruesa*. Disponible en: Repositorio de la Universidad de Oviedo.
- [2] Á. Fernández García. *Navegación y control de un robot móvil omnidireccional en ROS*. Disponible en: Repositorio de la Universidad de Oviedo.
- [3] S. Kalpajian, S.R. Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, México, 2008.
- [4] J.A. Perez Patiño. *Tratamientos térmicos de los aceros*. Publicaciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996.
- [5] *Manual de defectología e imperfecciones. Tren de chapa gruesa*. Arcelor Mittal. Febrero 2015.
- [6] *Catálogo de herramientas 2019*. Bosh. Disponible online: https://www.bosch-professional.com/es/media/service_relaunch/downloads/kataloge/profesional_verano_2019_esp-2.pdf Accedido 16/07/2019.
- [7] *Pocket guide to grinding*. Atlas Copco. 2015. Disponible online: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/gi/documents/Pocket%20Guide%20to%20Grinding%209833%208641%2001.pdf> Accedido 16/07/2019.
- [8] *Catálogo de herramientas 2019*. Atlas Copco. Disponible online: <https://www.atlascopco.com/es-es/itba/about-industrialtechnique/brochures-and-catalogs/catalogs> Accedido 16/07/2019
- [9] *Safety code for coated abrasives*. FEPA. Disponible online: <https://www.fepa-abrasives.com/abrasive-publications/fepa/safety-codes> Accedido 16/07/2019.
- [10] R. Laborda, D. Recalde, R. Tolsa, N. Marqués. *Manual de seguridad y salud en operaciones con herramientas manuales comunes, maquinaria de taller y soldadura*. Servicio de prevención de riesgos laborales UPV. 2004.
- [11] *Catálogo industria Norton 2019*. Norton Abrasives. Disponible online: <https://www.nortonabrasives.com/es-es/recursos/documentos> Accedido 16/07/2019
- [12] J.V. Segarra Larrosa. *Evaluación de riesgos por vibraciones mano-brazo de herramientas motorizadas*. Publicaciones de la Universidad Miguel Hernández. Septiembre 2016.
- [13] I. Iglesias, M.A. Sebastián, J.E. Ares. *Overview of the state of robotic machining: current situation and future potential*. Procedia Engineering. 2015
- [14] S. Agnard, Z. Liu, B. Hazel. *Material removal and wheel wear models for robotic grinding wheel profiling*. Procedia Engineering. 2015.
- [15] S. Nahavandi, M.J. Uddin, Y. Nazu, H. Trinh, M. Saadat. *Automated robot grinding by low-powered manipulator*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2007.
- [16] D. Thuot, Z Liu, H. Camplaud, J. Beaudry, P. Richard, M. Blain. *Remote robotic underwater grinding system and modeling for rectification of hydroelectric structures*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2013.
- [17] *Active Angular Kit*. FerRobotics. Disponible online: <https://www.ferrobotics.com/en/technology-products/produkte/aak/> Accedido 16/07/2019.
- [18] *Instrucciones de funcionamiento y seguridad 8220*. Dremel Europe. Disponible online: https://www.dremel.com/documents/20812/137350/NEW+1600A012FX_01-17_8220.pdf Accedido 16/07/2019.
- [19] B. Kral. *Debunking “conventional wisdom” in actuator selection and deployment*. Bimba Manufacturing Co. 2011. Disponible online: <https://www.controldesign.com/assets/11WPpdf/111116-bimba-actuator-selection.pdf> Accedido 16/07/2019.

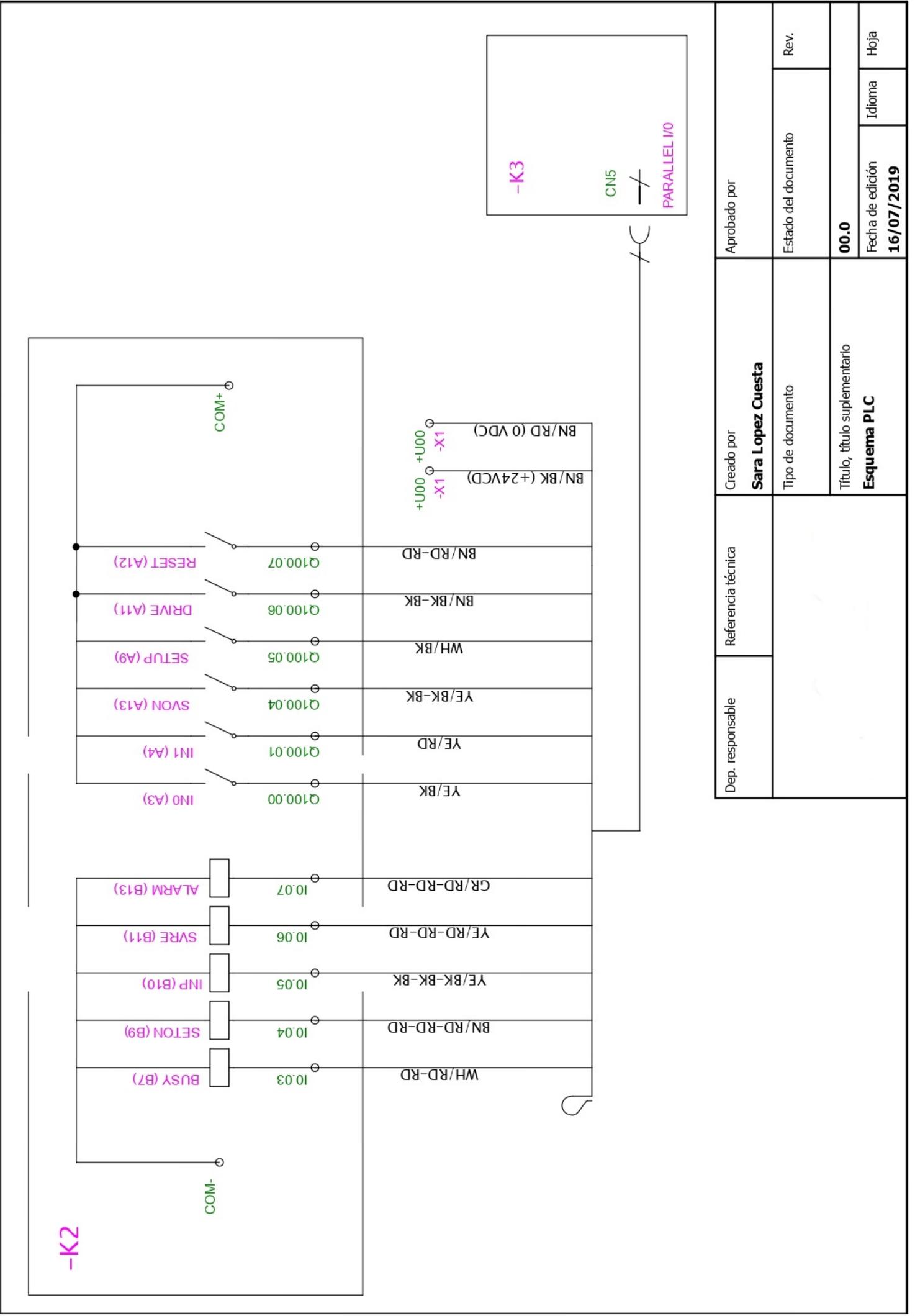
- [20] *LEYG25MB-100 datasheet*. SMC. Disponible online: https://stevenengineering.com/Tech_Support/PDFs/70AELEYG.pdf Accedido 16/07/2019.
- [21] *LECP61E datasheet*. SMC. Disponible online: https://www.smc Pneumatics.com/pdfs_smc_instructional/LEC-OM00603_E.pdf Accedido 16/07/2019.
- [22] *CP1E CPU Unit Harwdware Manual*. Omron. Disponible online: http://www.omron.com.au/data_pdf/mnu/w479-e1-10_cp1e.pdf?id=2064 Accedido 16/0/2019.
- [23] *DryLin Actuadores Lineales*. Igus. Disponible online: <https://es.scribd.com/document/224512692/ES-Drylin-Web-Actuadores-Lineales> Accedido 16/07/2019.
- [24] *QSH5718 Manual*. Trinamic. Disponible online: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Motors_Documents/QSH5718_manual.pdf Accedido 16/07/2019.
- [25] *PD-1161 Hardware Manual*. Trinamic. Disponible online: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Drives_Documents/PD-1161_hardware_manual.pdf Accedido 16/07/2019.
- [26] *TMCM-1161 Firmware Manual*. Trinamic. Disponible online: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Modules_Documents/TMCM-1161_TMCL_firmware_manual.pdf Accedido 16/07/2019.
- [27] *Qt Documentation*. Disponible online: <https://doc.qt.io/qt-5/qserialport.html> Accedido 16/07/2019.
- [28] *The Single Board Computer Database*. Disponible online: <https://www.hackerboards.com/home.php> Accedido 16/07/2019.
- [29] *Wiring Pi Project*. Disponible online: <http://wiringpi.com/> Accedido 16/07/2019.
- [30] *Pi4J Project*. Disponible online: <https://pi4j.com/1.2/index.html> Accedido 16/07/2019.
- [31] Single relay board datasheet. Parallax. Disponible online: <https://www.parallax.com/sites/default/files/downloads/27115-Single-Relay-Board-Guide-v1.0.pdf> Accedido 16/07/2019.
- [32] *HCPL-3120 datasheet*. Avago Technologies. Disponible online: <https://www.promelec.ru/pdf/HCPL-3120-J312,%20HCNW3120.pdf> Accedido 16/07/2019.
- [33] G. Valiño. *Fabricación y diseño de piezas de chapa*. Apuntes de la asignatura de “Fabricación de Productos en Serie” del segundo curso del Máster en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Oviedo. 2019.
- [34] Restricciones de diseño en fabricación aditiva. Servicio de impresión 3D Medialab Uniovi. Disponible online: <https://www.unioviedo.es/medialab/servicio-de-impresion-3d/>

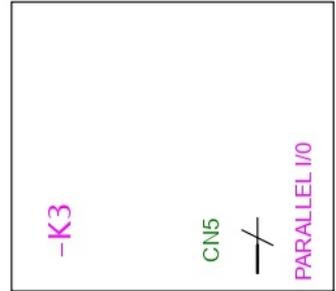
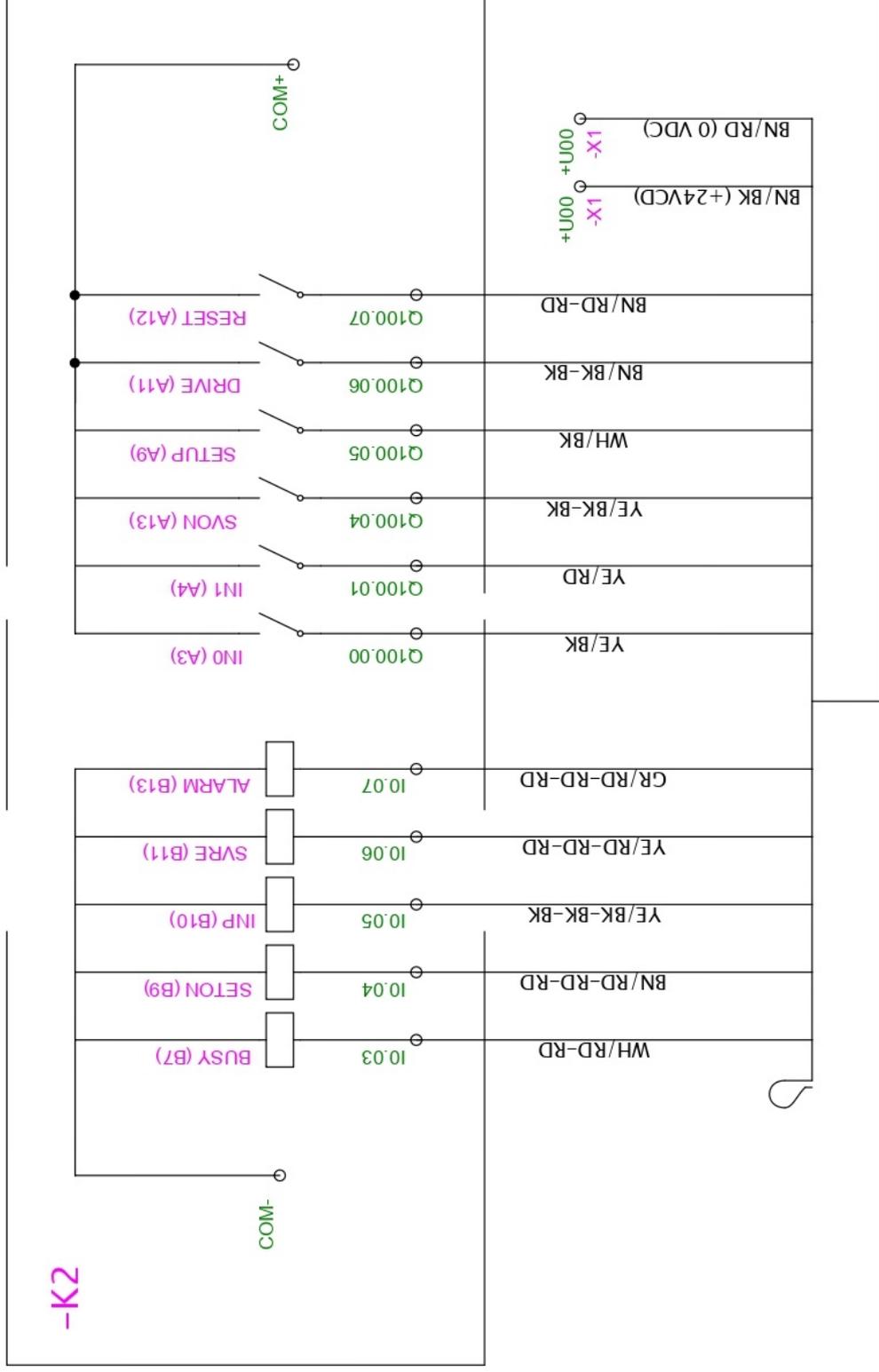
ANEXOS

ANEXO I
ESQUEMAS ELÉCTRICOS

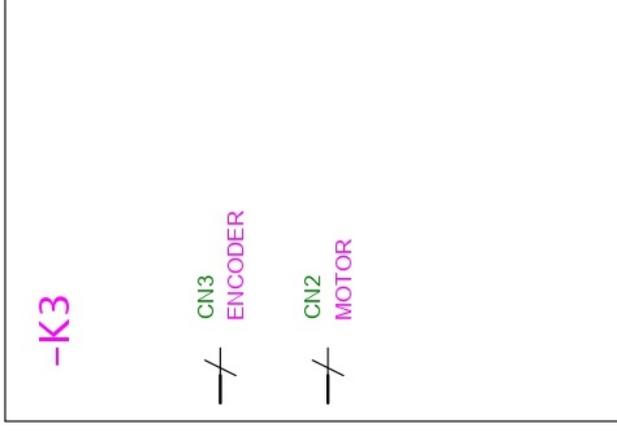
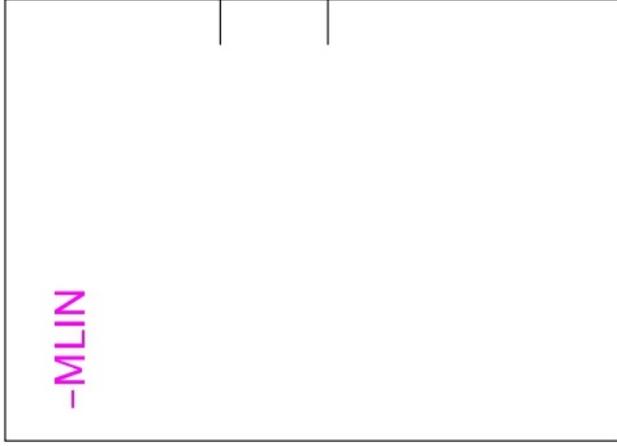
Designación de elementos

Referencia	Descripción
+U00	Subsistema 1
+U01	Subsistema 2
-X1	Alimentación
-K1	PC
-K2	PLC
-K3	Controlador SMC
-OPT	Optoacoplador
-MLIN	Actuador lineal SMC

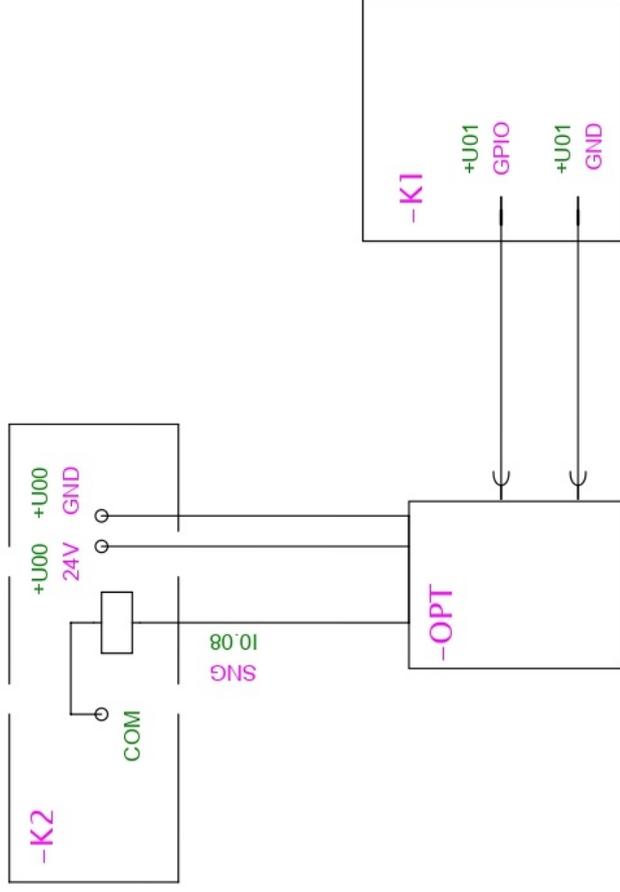




Dep. responsable	Referencia técnica	Creado por	Aprobado por
		Sara Lopez Cuesta	
		Tipo de documento	Estado del documento
		Título, título suplementario	Rev.
		Esquema PLC	00.0
		Fecha de edición	Idioma
		16/07/2019	Hoja



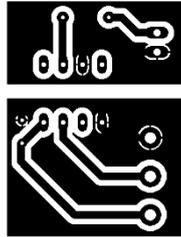
Dep. responsable	Referencia técnica	Creado por Sara López Cuesta	Aprobado por
		Tipo de documento	Estado del documento
		Título, título suplementario Esquema conexión controlador del cilindro y cilindro	Rev.
		00.2	
		Fecha de edición 16/07/2019	Idioma
			Hoja



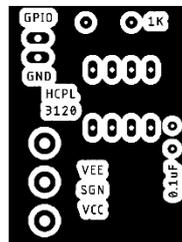
Dep. responsable	Referencia técnica	Creado por Sara López Cuesta	Aprobado por
		Tipo de documento	Estado del documento
		Título, título suplementario Esquema conexión Raspberry Y PLC	Rev.
			00.3
			Fecha de edición 16/07/2019
			Idioma
			Hoja

ANEXO II
FOOTPRINTS PCB

BOTTOM

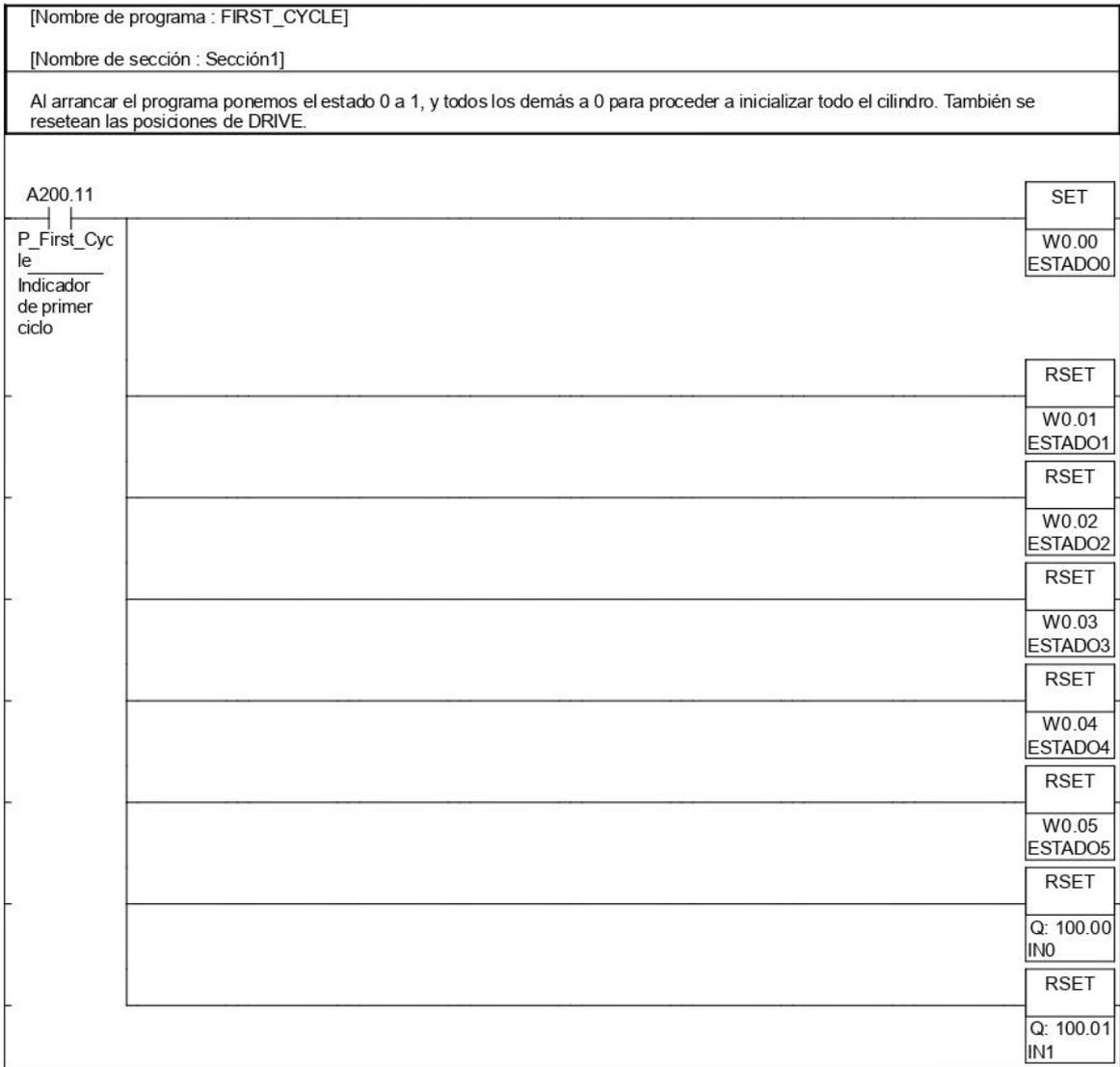


TOP



ANEXO III
CÓDIGO PLC

000000
(000000)



ESTADO 0
<W000.00>
a009 a013

ESTADO 1
<W000.01>
a018 a023 a028

ESTADO 2
<W000.02>
a037

ESTADO 3
<W000.03>
a045 a050 a056

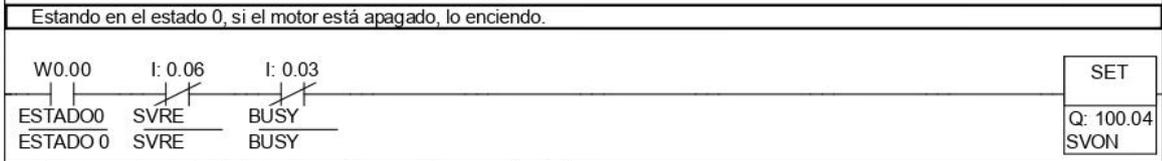
ESTADO 4
<W000.04>
a065

ESTADO 5
<W000.05>
a073 a078 a084

IN0

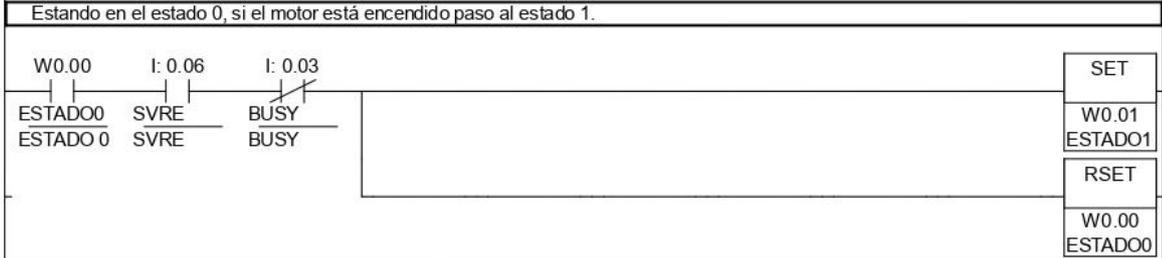
IN1

000001
(000009)



SVON

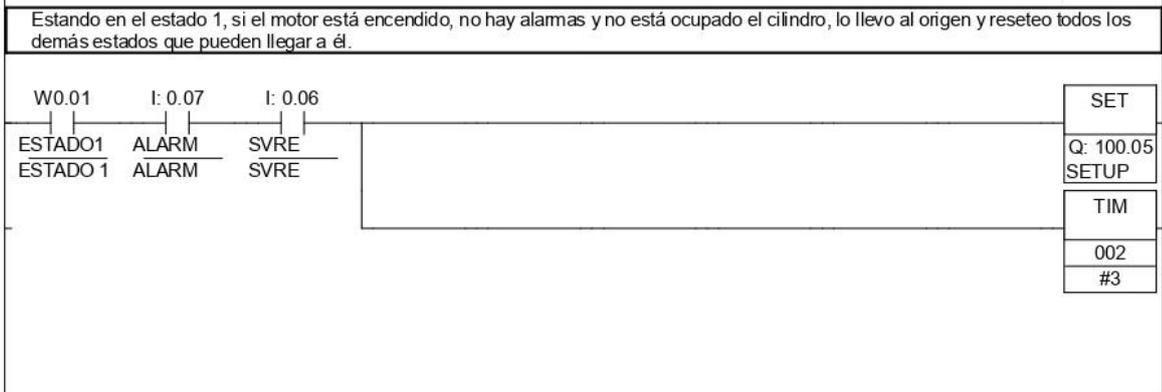
000002
(000013)



ESTADO 1
<W000.01>
a018 a023 a028

ESTADO 0
<W000.00>
a009 a013

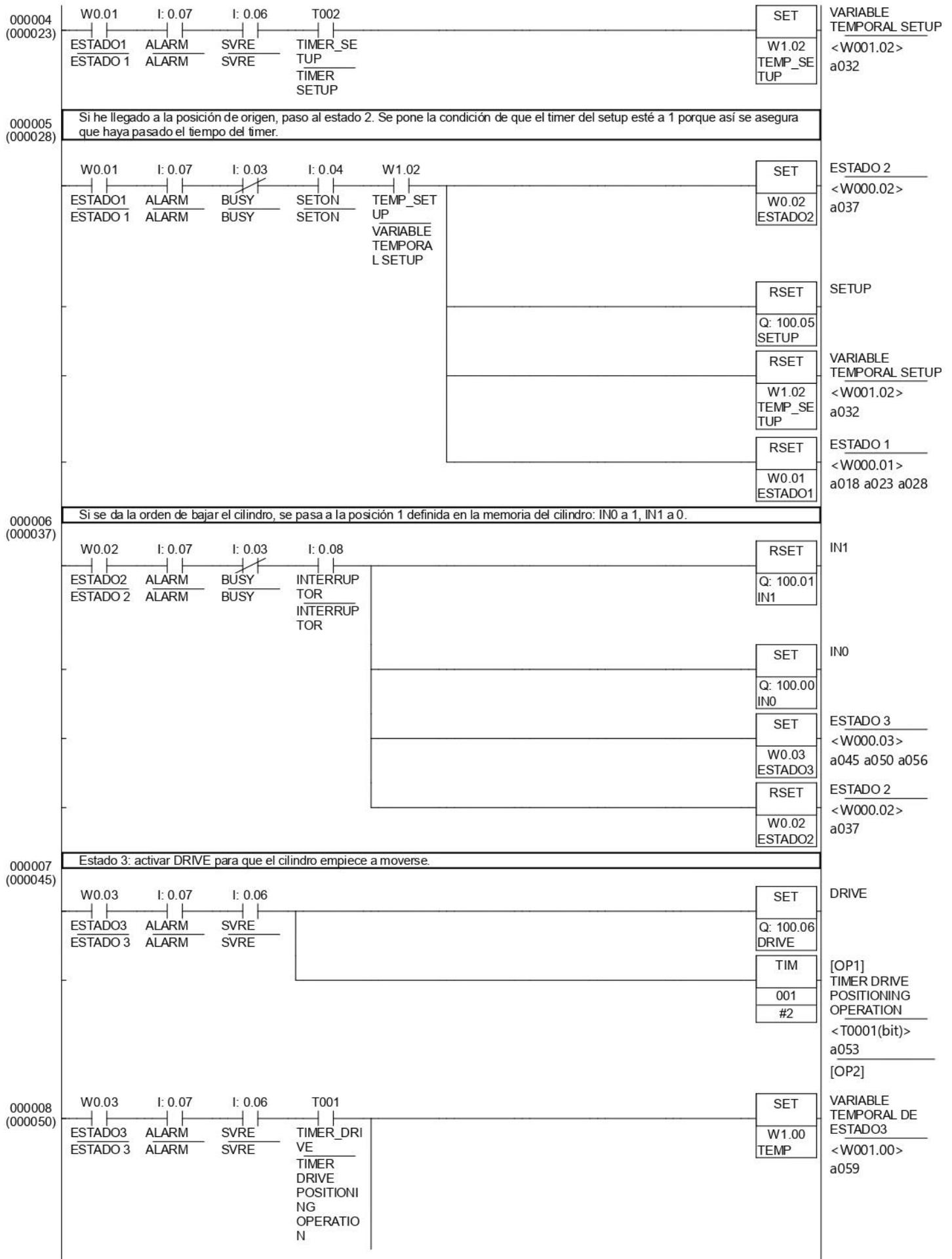
000003
(000018)

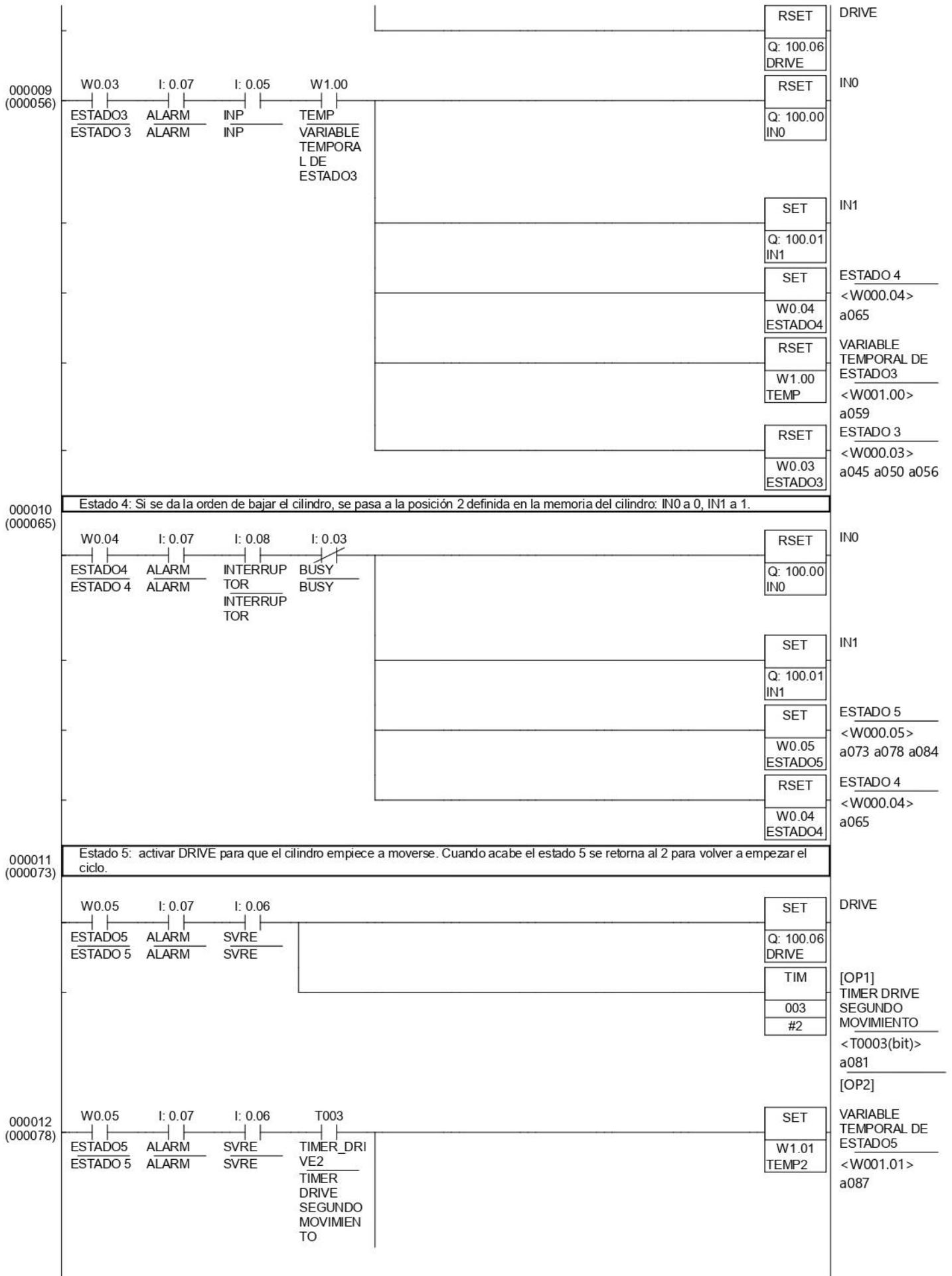


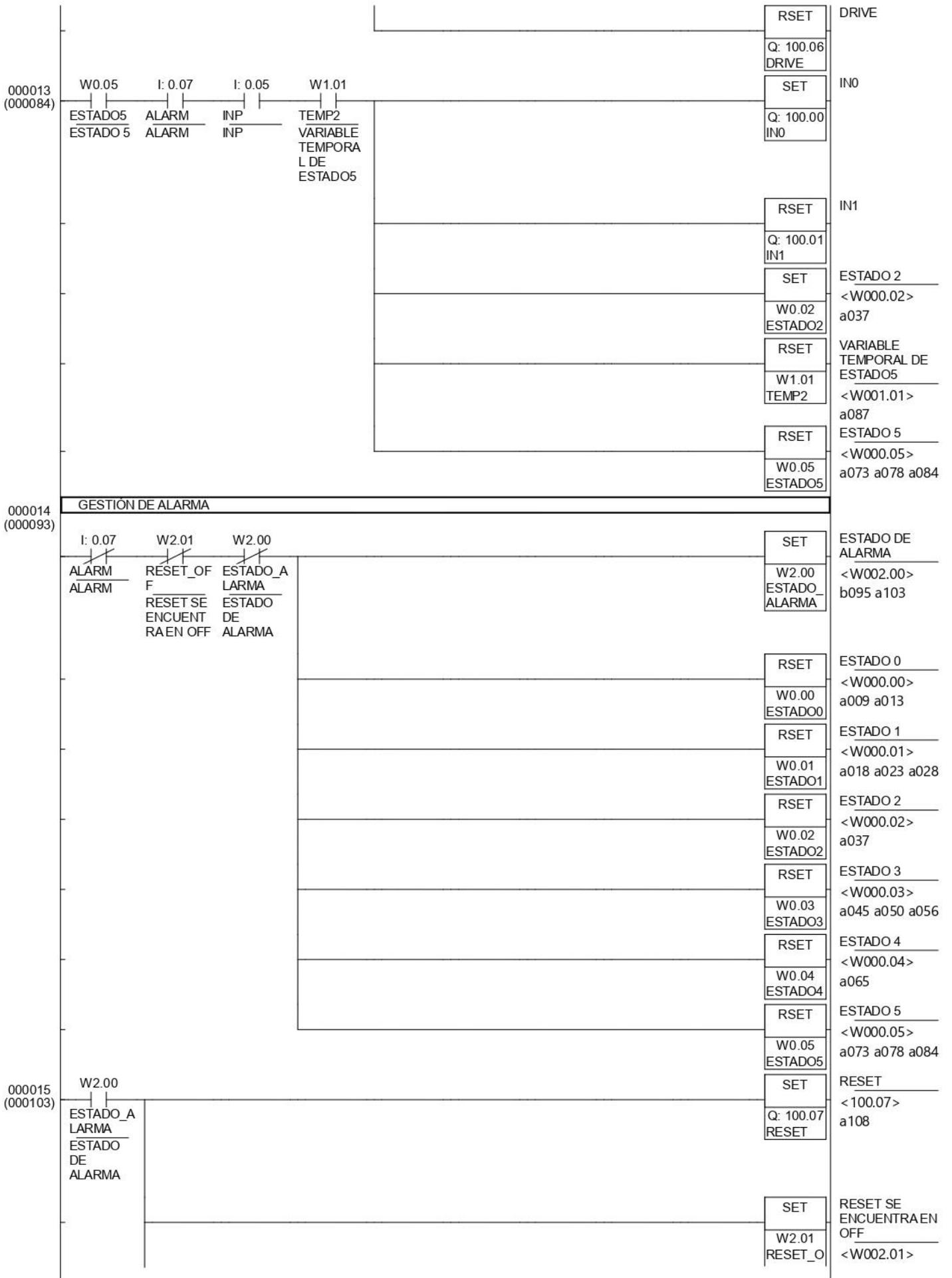
SETUP

[OP1]
TIMER SETUP
<T0002(bit)>
a026

[OP2]

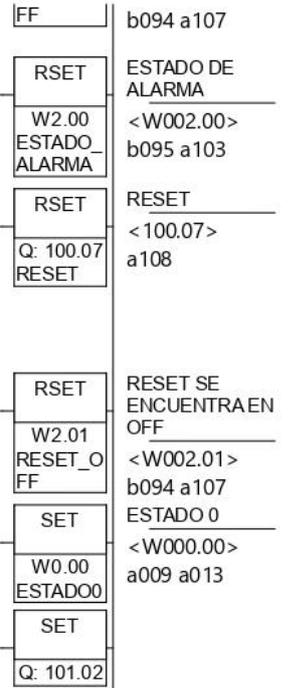




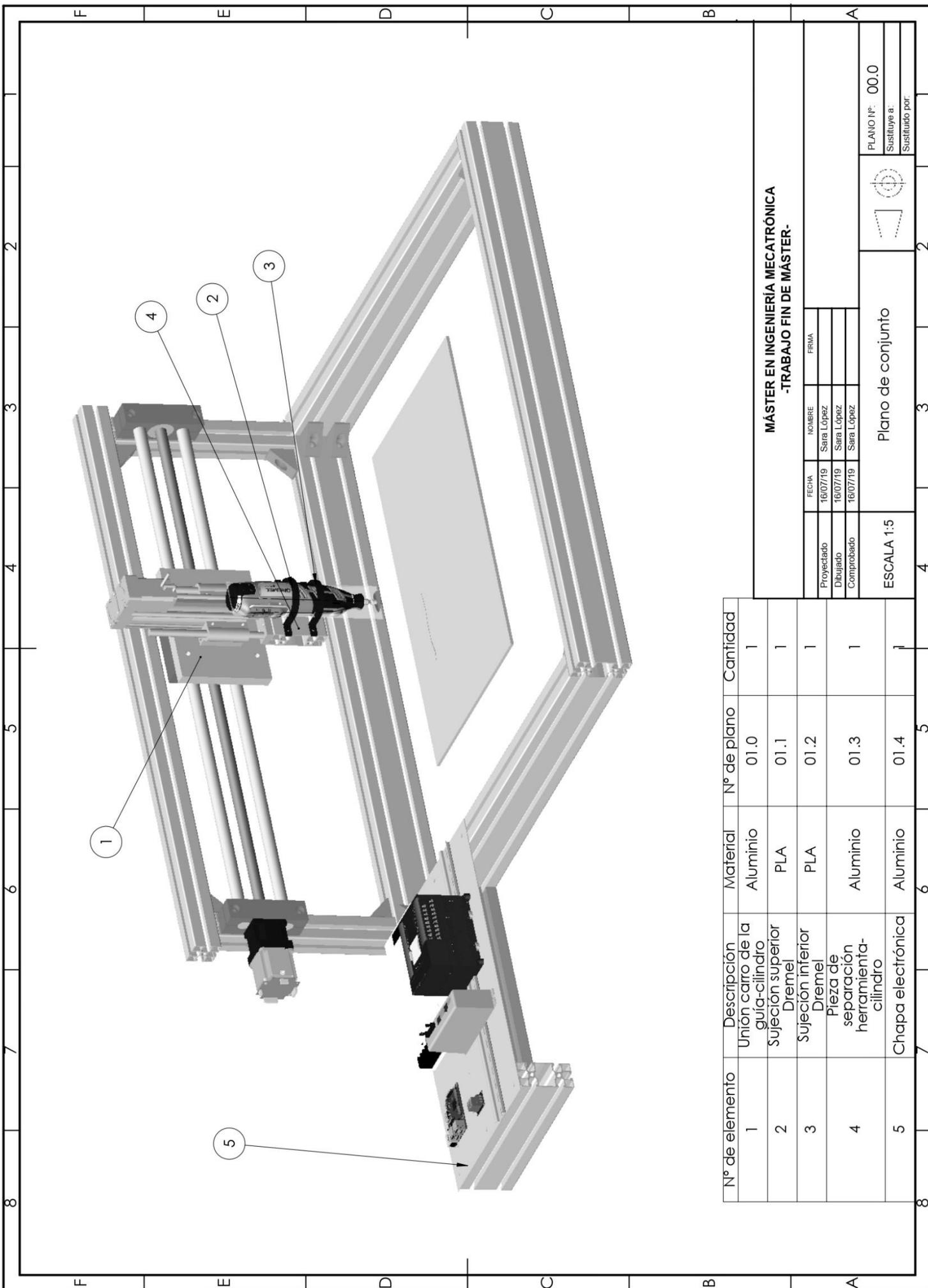


000016
(000107)

W2.01 Q: 100.07 I: 0.07
RESET_OF RESET ALARM
F RESET ALARM
RESET SE
ENCUENT
RA EN OFF



ANEXO IV
PLANOS MECÁNICOS

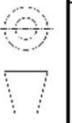


Nº de elemento	Descripción	Material	Nº de plano	Cantidad
1	Unión caíro de la guía-cilindro	Aluminio	01.0	1
2	Sujeción superior Dremel	PLA	01.1	1
3	Sujeción inferior Dremel	PLA	01.2	1
4	Pieza de separación herramienta-cilindro	Aluminio	01.3	1
5	Chapa electrónica	Aluminio	01.4	1

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

FECHA	NOMBRE	FRIMA
16/07/19	Sara López	
16/07/19	Sara López	
16/07/19	Sara López	

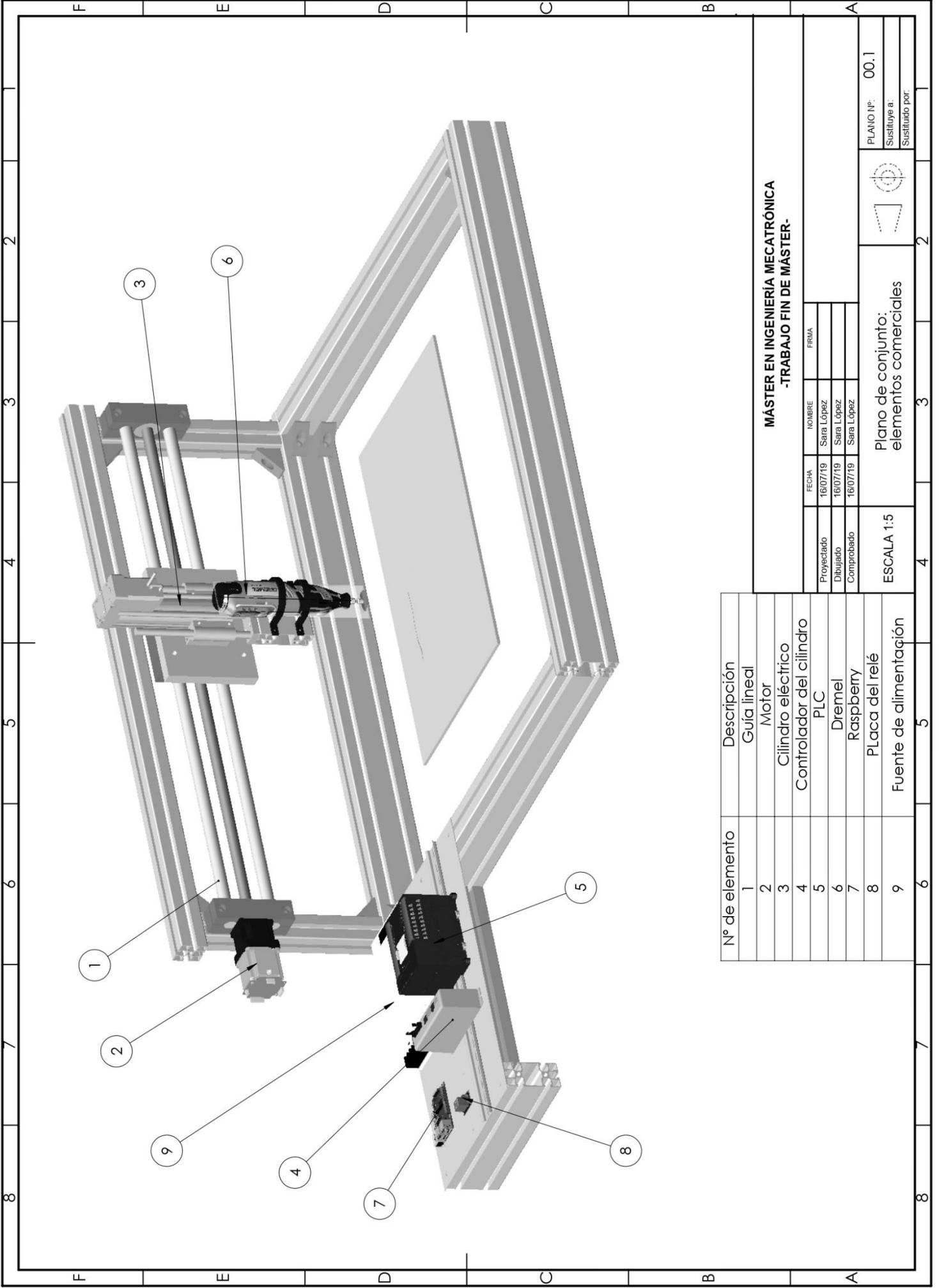
PLANO Nº: 00.0
Sustituye a:
Sustituido por:



Plano de conjunto

ESCALA 1:5

8 7 6 5 4 3 2 2 2 2



Nº de elemento	Descripción
1	Guía lineal
2	Motor
3	Cilindro eléctrico
4	Controlador del cilindro
5	PLC
6	Dremel
7	Raspberry
8	Placa del relé
9	Fuente de alimentación

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

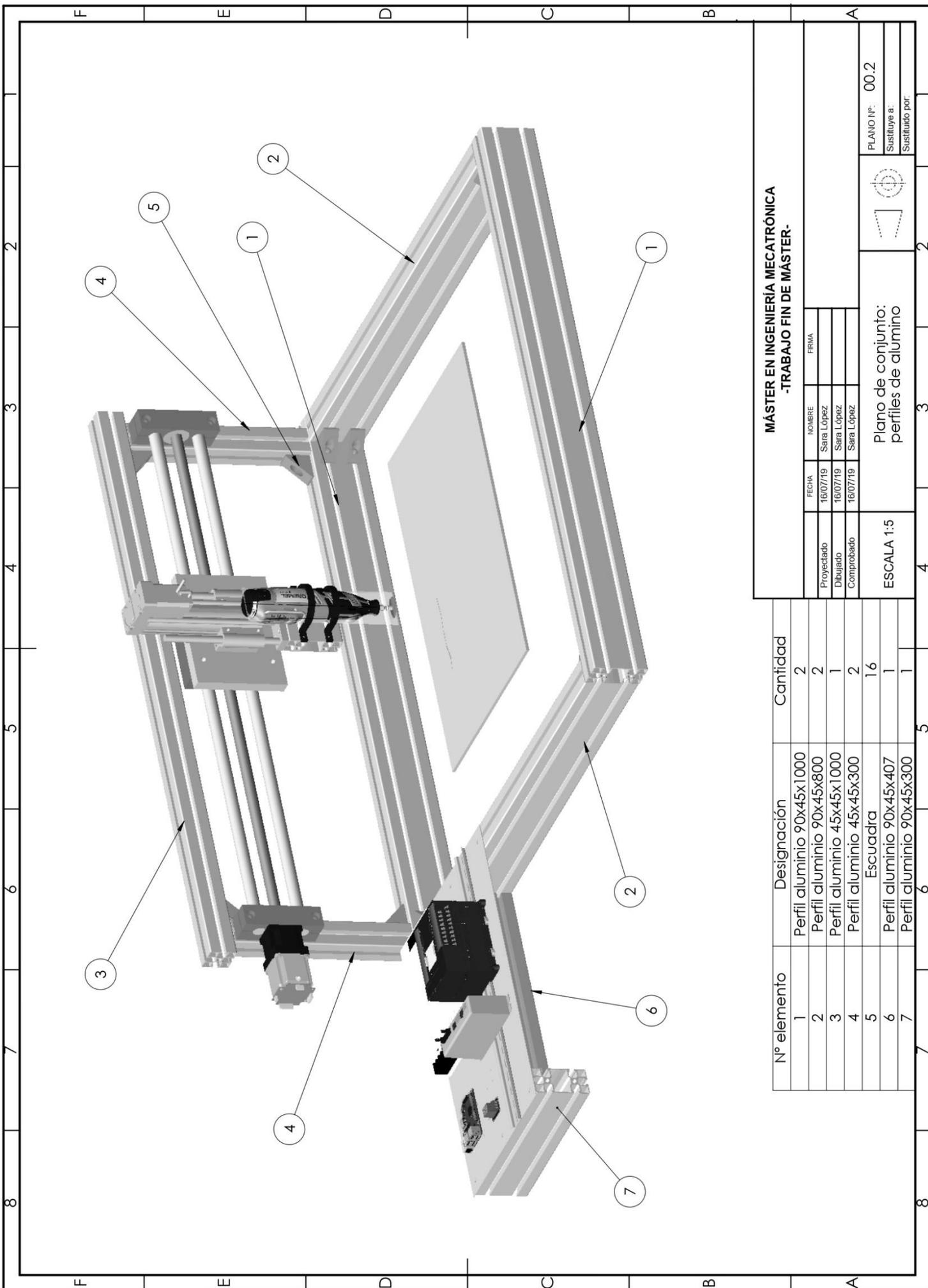
FECHA	NOMBRE	FRMA
16/07/19	Sara López	
16/07/19	Sara López	
16/07/19	Sara López	

Proyectado
Dibujado
Comprobado

PLANO Nº: 00.1
Sustituye a:
Sustituido por:

Plano de conjunto:
elementos comerciales

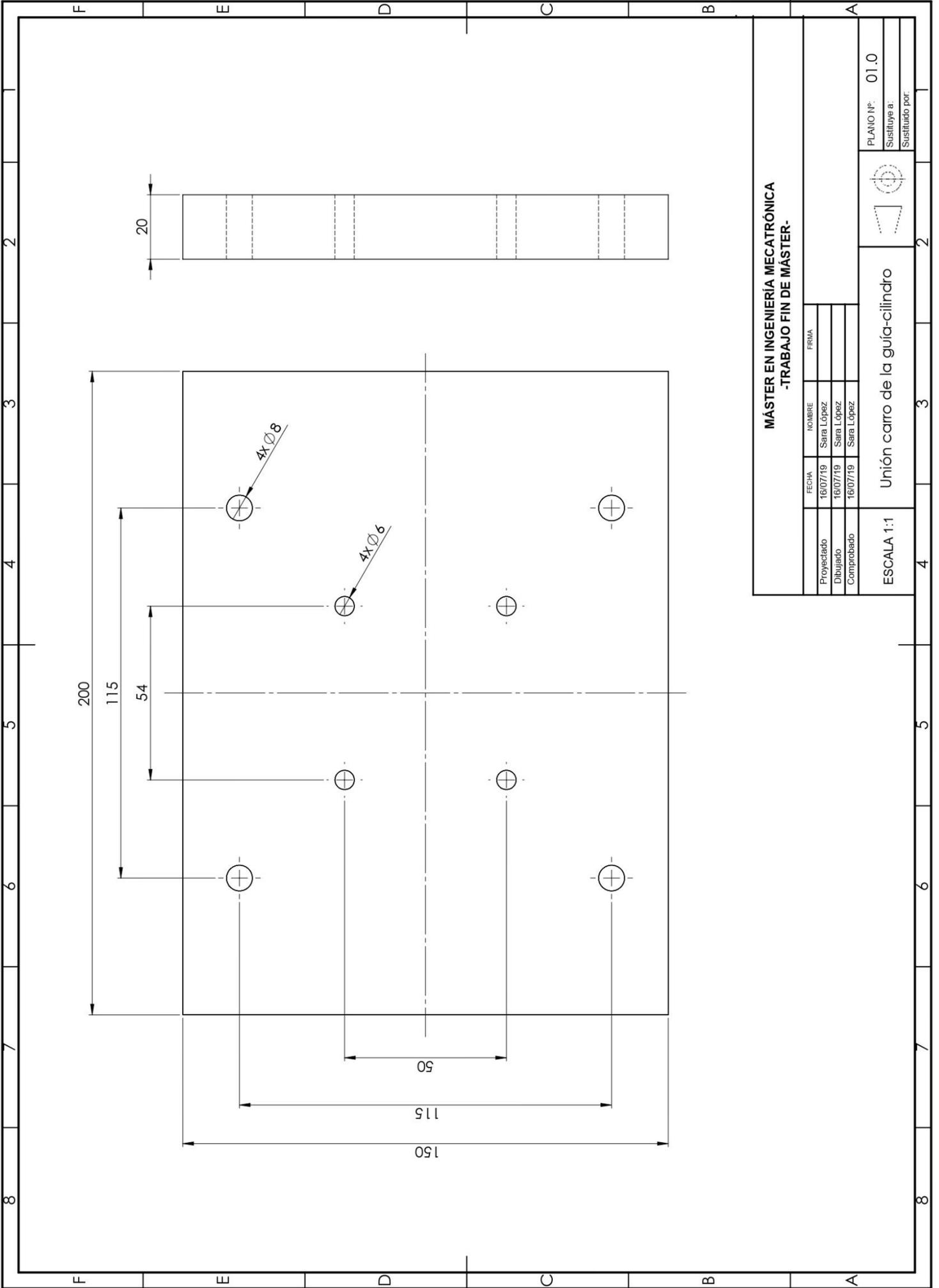
ESCALA 1:5



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

Proyectado	16/07/19	NOMBRE	Sara López	FECHA	16/07/19	FRIMA	
Dibujado	16/07/19		Sara López		16/07/19		
Comprobado	16/07/19		Sara López		16/07/19		
ESCALA 1:5				Plano de conjunto: perfiles de aluminio			
PLANO Nº: 00.2				Sustituye a:			
				Sustituido por:			

Nº elemento	Designación	Cantidad
1	Perfil aluminio 90x45x1000	2
2	Perfil aluminio 90x45x800	2
3	Perfil aluminio 45x45x1000	1
4	Perfil aluminio 45x45x300	2
5	Escuadra	16
6	Perfil aluminio 90x45x407	1
7	Perfil aluminio 90x45x300	1



MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
-TRABAJO FIN DE MÁSTER-

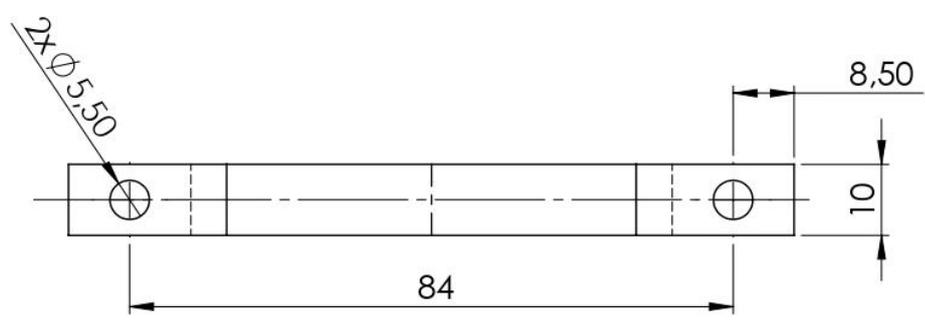
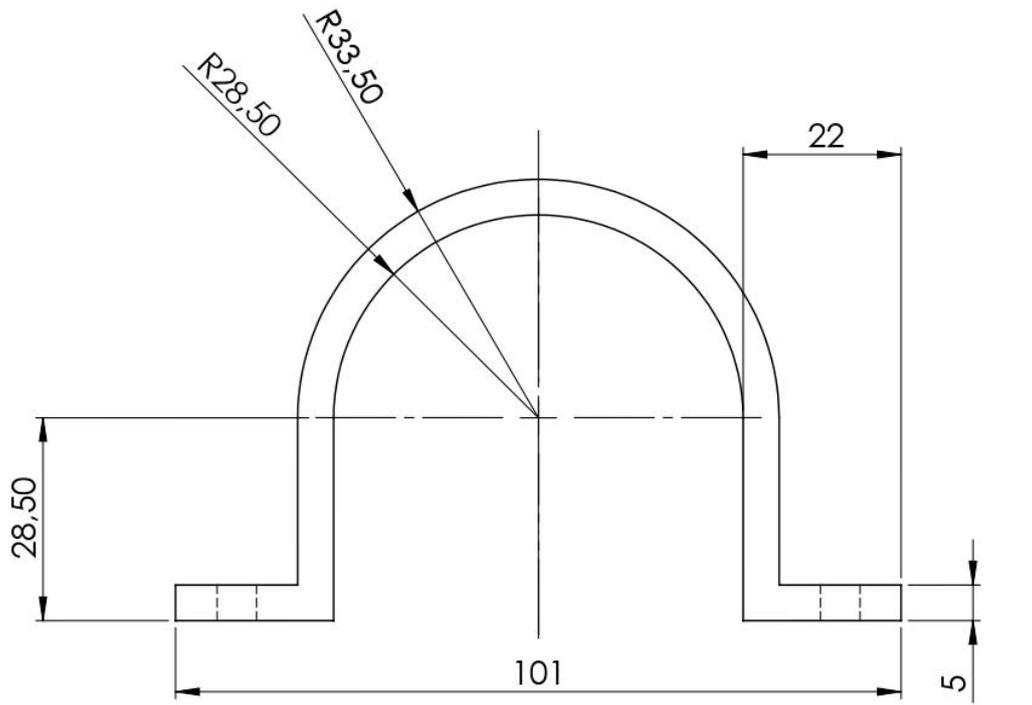
FECHA		NOMBRE		FIRMA	
Proyectado	16/07/19	Sara López			
Dibujado	16/07/19	Sara López			
Comprobado	16/07/19	Sara López			

PLANO N°: 01.0
 Sustituye a:
 Sustituido por:



Unión carro de la guía-cilindro

ESCALA 1:1

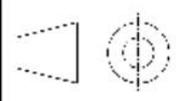


**MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
-TRABAJO FIN DE MÁSTER-**

	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	16/07/19	Sara López	
Dibujado	16/07/19	Sara López	
Comprobado	16/07/19	Sara López	

ESCALA 1:1

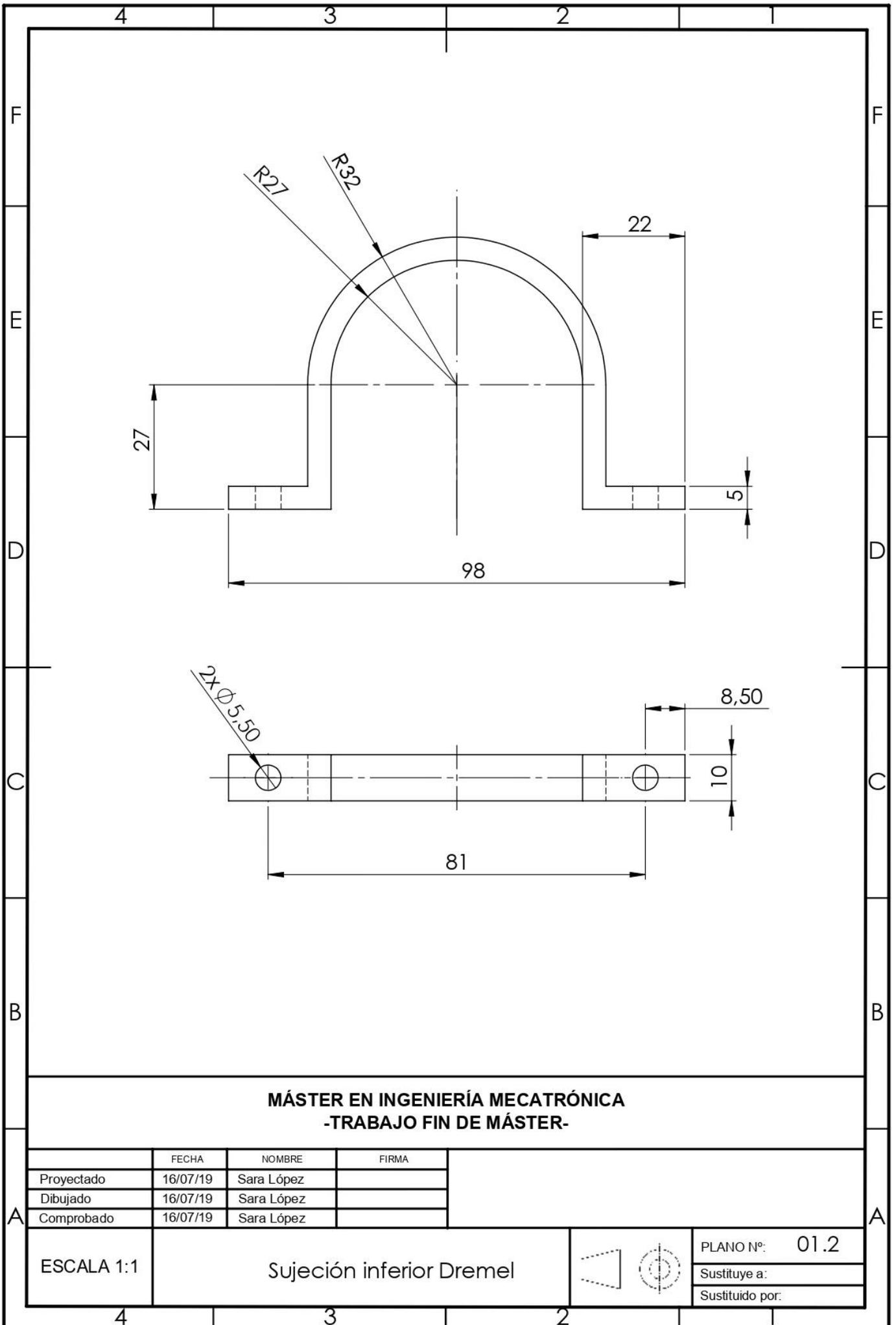
Sujeción superior Dremel



PLANO Nº: 01.1

Sustituye a:

Sustituido por:



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

	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	16/07/19	Sara López	
Dibujado	16/07/19	Sara López	
Comprobado	16/07/19	Sara López	

ESCALA 1:1

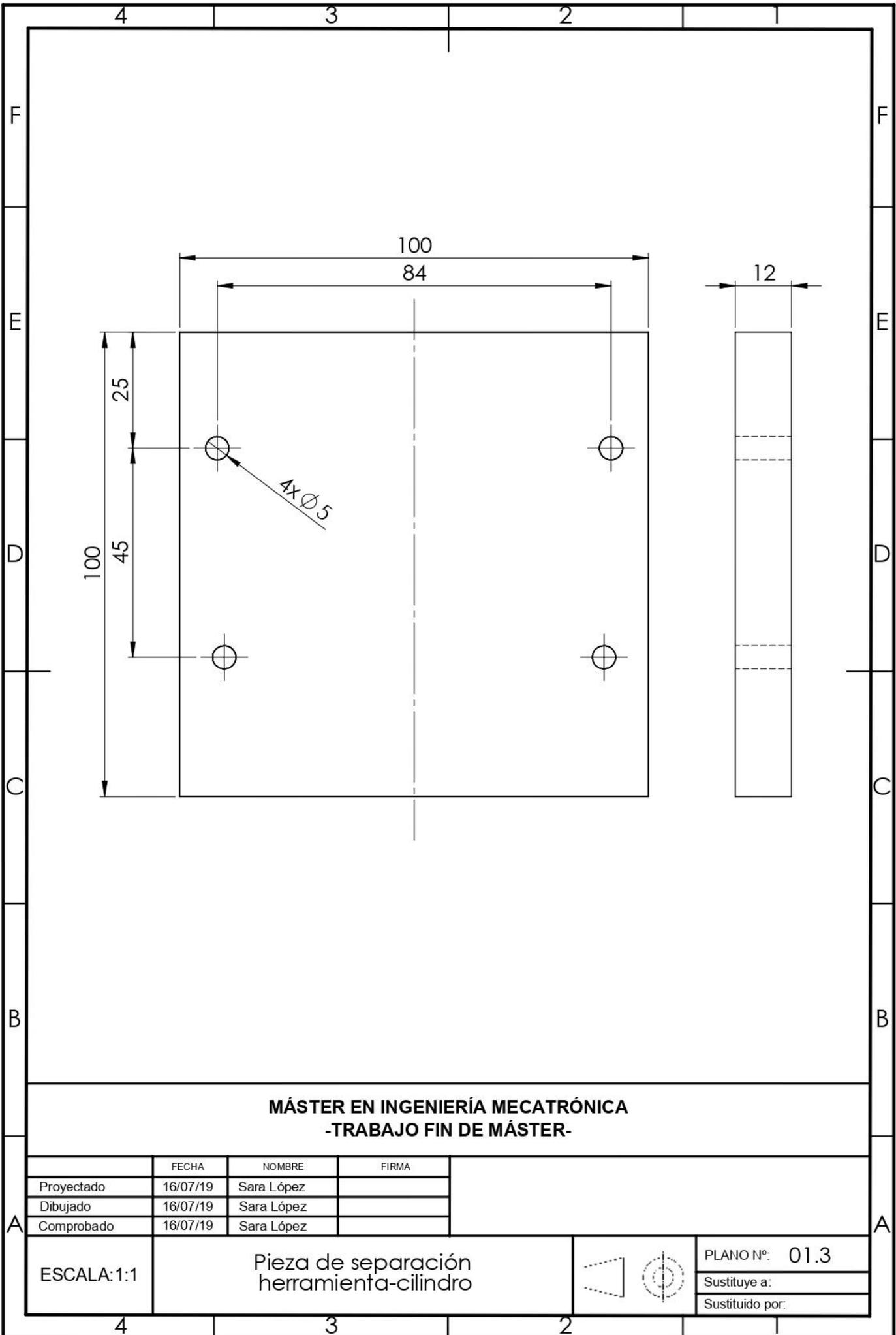
Sujeción inferior Dremel



PLANO Nº: 01.2

Sustituye a:

Sustituido por:



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

	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	16/07/19	Sara López	
Dibujado	16/07/19	Sara López	
Comprobado	16/07/19	Sara López	

ESCALA: 1:1

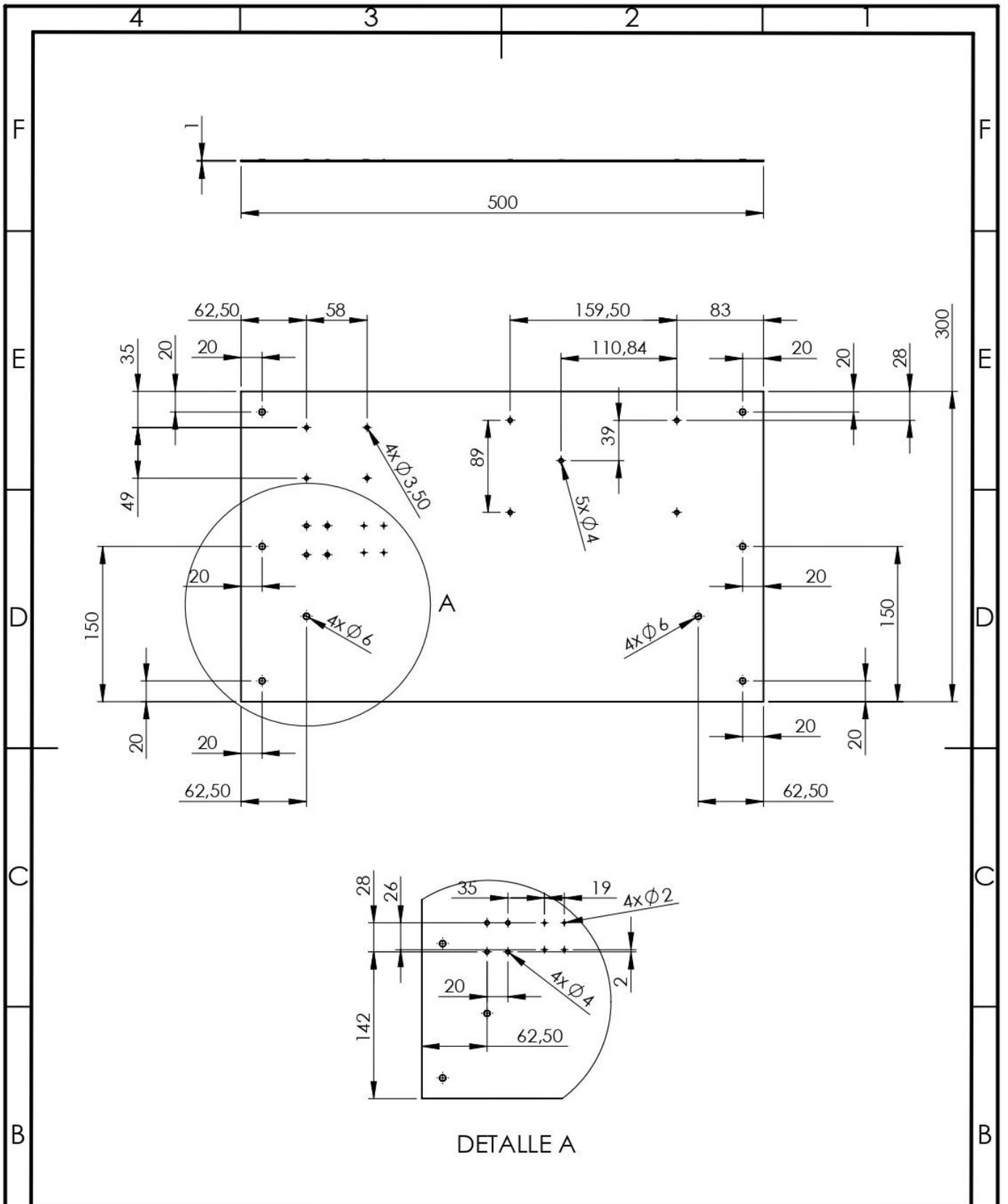
Pieza de separación
herramienta-cilindro



PLANO Nº: 01.3

Sustituye a:

Sustituido por:



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

	FECHA	NOMBRE	FIRMA
Proyectado	16/07/19	Sara López	
Dibujado	16/07/19	Sara López	
Comprobado	16/07/19	Sara López	

ESCALA 1:5

Chapa electrónica



PLANO Nº: 01.4

Sustituye a:

Sustituido por:

