



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

REACONDICIONAMIENTO (RETROFIT) DE UNA  
FRESADORA DE CNC DE SOBREMESA.  
CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR CNC.

Autor: Rodrigo García Sánchez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Raúl Cambor Iglesias

Junio 2024



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título REACONDICIONAMIENTO (RETROFIT) DE UNA FRESADORA DE CNC DE SOBREMESA. CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR CNC. en la ETS de Ingeniería en Tecnologías Industriales ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Rodrigo García Sánchez. Fecha: 05/ 07/ 2023

Handwritten signature of Rodrigo García in black ink.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Handwritten signature of Mariano Jiménez in blue ink.

Fdo.: Mariano Jiménez Calzado Fecha: 08/07/24

Handwritten signature of Raúl Cambor Iglesias in black ink.

Fdo.: Raúl Cambor Iglesias Fecha: 08/07/24



# **RETROFIT DE UNA FRESADORA DE CNC DE SOBREMESA. CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR CNC.**

**Autor: García Sánchez, Rodrigo.**

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Codirector: Cambor Iglesias, Raúl

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

En este proyecto se analiza una fresadora de control numérico de sobremesa que está inoperativa debido a la falta de un controlador. Se analizaron las funcionalidades deseadas y se diseñó un controlador que permitiese trabajar fuera de línea. Se realizó la fabricación y montaje del controlador, así como la adecuación de la fresadora al nuevo controlador. Se diseñó y realizó un ensayo para averiguar la resolución de la máquina en el eje X y el eje Y así como la perpendicularidad entre ambos. Finalmente se realizó un pequeño análisis del presupuesto

**Palabras clave:** Retrofit, control numérico, CNC, diseño de controlador, fabricación.

## **1. Introducción**

Las fresadoras CNC son máquinas herramienta utilizadas para la generación de contornos complejos en piezas sólidas [1]. El rápido avance de la tecnología hace que los controladores de estas máquinas queden obsoletos, como es el caso de la fresadora CNC de sobremesa que se encuentra en el FABLAB de ICAI. El reacondicionamiento o retrofit consiste en añadir nuevas tecnologías o funcionalidades a un elemento, lo que permite adaptarlo a nuevas necesidades y alargar su vida útil [2].

## **2. Definición del proyecto.**

Este proyecto trata del retrofit realizado para poner en marcha la fresadora CNC de sobremesa del FABLAB de ICAI. Dicho retrofit consiste principalmente en el diseño y fabricación de un nuevo controlador, así como la adecuación de la máquina al nuevo controlador y las normativas vigentes.

## **3. Metodología**

Para realizar el retrofit se procederá en primer lugar a analizar la máquina y los elementos del controlador obsoleto. Una vez hecho esto, se decidirán cuáles van a ser las funcionalidades del nuevo controlador y se realizará el diseño de este. Posteriormente se procederá a la fabricación y montaje del controlador. Finalmente se realizarán pruebas de verificación del funcionamiento de la fresadora.

## 4. Resultados

Se logró poner en funcionamiento la fresadora. El nuevo controlador cuenta con las funcionalidades con las ha sido rediseñado, y tiene la posibilidad de ser ampliado en el futuro. Los resultados de las pruebas de verificación realizadas son satisfactorios obteniéndose una resolución en el eje X y el eje Y de 0,1mm y un error de perpendicularidad entre estos ejes de 0,063°. El coste de materiales superó el presupuesto inicial debido a funcionalidades y materiales que no se tuvieron en cuenta al inicio del proyecto.



*Ilustración 1: Interior del controlador [Elaboración propia]*



*Ilustración 2: Controlador y fresadora tras acabar el proyecto [Elaboración propia]*

## 5. Conclusiones

La documentación de una máquina debe permanecer siempre localizable. El retrofit es una práctica que permite alargar la vida útil de las máquinas, así como adaptarlas a las necesidades específicas de operación o producción. Los resultados obtenidos del ensayo de verificación son satisfactorios, aunque se podrían mejorar afinando los parámetros de la máquina y las condiciones del ensayo. Desde el punto de vista económico, la decisión de realizar un retrofit en este caso ha sido acertada, ya que los resultados han sido satisfactorios y la inversión ha sido menor que la de adquirir una máquina nueva con características similares.

## 6. Referencias

- [1] *Development of tool condition monitoring system in end milling process using wavelet features and Hoelder's exponent with machine learning algorithms.* **T. Mohanraj, Jayanthi Yerchuru, H. Krishnan, R.S. Nithin Aravind, R. Yameni.** 108671, s.l. : Measurements, 2021, Vol. 173. ISSN 0263-2241.
- [2] *Seismic retrofit solutions: An overview.* **Clifton, G. C., & Bull, J. F.** 2014.

# **RETROFITTING A DESKTOP CNC ROUTER. CONSTRUCTION OF THE CNC CONTROLLER.**

**Author: García Sánchez, Rodrigo.**

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Cosupervisor: Cambor Iglesias, Raúl

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

In this project, a desktop numerical control router, which is currently inoperative due to the lack of a controller, is analyzed. The desired functionalities were assessed, and a controller was designed to allow offline operation. The manufacturing and assembly of the controller were conducted, as well as the adaptation of the router to the new controller. A test was designed and conducted to determine the resolution of the machine on the X and Y axes, as well as the perpendicularity between them. Finally, a brief budget analysis was performed.

**Keywords:** Retrofit, numeric control, CNC, controller design, fabrication.

## **1. Introduction**

CNC milling machines are machine tools used for generating complex contours on solid parts [1]. The rapid advancement of technology renders the controllers of these machines obsolete, as is the case with the desktop CNC milling machine at the ICAI FABLAB. Retrofitting involves adding new technologies or functionalities to an element, allowing it to adapt to new needs and extend its useful life [2].

## **2. Project definition.**

This project deals with the retrofit conducted to put the desktop CNC milling machine at the ICAI FABLAB into operation. This retrofit mainly consists of designing and manufacturing a new controller, as well as adapting the machine to the new controller and current regulations.

## **3. Methodology**

To conduct the retrofit, the first step will be to analyze the machine and the components of the obsolete controller. Once this is done, the functionalities of the new controller will be decided, and its design will be conducted. Subsequently, the controller will be manufactured and assembled. Finally, verification tests of the milling machine's operation will be conducted.

## 4. Results

The milling machine was successfully put into operation. The new controller includes all the functionalities it was designed for and has the potential for future expansion. The results of the verification tests are satisfactory, achieving a resolution on the X and Y axes of 0.1mm and a perpendicularity error between these axes of  $0.063^\circ$ . The cost of materials exceeded the initial budget due to functionalities and materials that were not considered at the beginning of the project.



*Illustration 1: Controller interior [Own work]*



*Illustration: Controller and router after finishing the project [Own work]*

## 5. Conclusions

The documentation of a machine must always remain accessible. Retrofitting is a practice that allows extending the useful life of machines, as well as adapting them to specific operational or production needs. The results obtained from the verification test are satisfactory, although they could be improved by fine-tuning the machine parameters and test conditions. From an economic standpoint, the decision to perform a retrofit in this case was correct, as the results have been satisfactory, and the investment was lower than acquiring a new machine with a similar performance.

## 6. References

- [1] *Development of tool condition monitoring system in end milling process using wavelet features and Hoelder's exponent with machine learning algorithms.* **T. Mohanraj, Jayanthi Yerchuru, H. Krishnan, R.S. Nithin Aravind, R. Yameni.** 108671, s.l. : Measurements, 2021, Vol. 173. ISSN 0263-2241.
- [2] *Seismic retrofit solutions: An overview.* **Clifton, G. C., & Bull, J. F.** 2014.

# Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción. ....	1
1.1 Motivos para realizar un retrofit en máquinas o instalaciones industriales. ....	1
1.2 Acciones necesarias una vez realizado el retrofit. ....	3
1.3 Máquinas fresadoras. ....	4
Capítulo 2. Estado de la cuestión. ....	6
2.1 Fresadora. ....	7
2.1.1 Motor fresador ( <i>spindle</i> ). ....	7
2.1.2 Estructura. ....	9
2.1.3 Guías y husillos. ....	11
2.1.4 Motores paso a paso. ....	12
2.1.5 Finales de carrera mecánicos. ....	13
2.1.6 Cableado. ....	13
2.2 Controlador. ....	15
2.2.1 Puerto USB. ....	16
2.2.2 Puertos para sondas. ....	16
2.2.3 Bornes 24V. ....	17
2.2.4 Enchufe schuko. ....	18
2.2.5 Ventilador. ....	18
2.2.6 Conector XLR de 3 pines. ....	19
2.2.7 Puertos serie de 9 pines. ....	19
2.2.8 Toma de alimentación. ....	20
Capítulo 3. Diseño del control. ....	21
3.1 Metodología. ....	21
3.2 Funcionalidades. ....	22
3.2 Elementos de seguridad. ....	23
3.3 Otros criterios de diseño. ....	23

3.3.1	<i>Diseño modular</i> .....	23
3.3.2	<i>Criterio económico</i> .....	24
3.3.3	<i>Criterio ecológico</i> .....	24
3.3.4	<i>Criterio de simplicidad</i> .....	25
3.3.5	<i>Criterio de mantenibilidad</i> .....	25
3.4	Diseño final.....	25
3.4.1	<i>Elección de componentes</i> .....	27
3.4.2	<i>Conexión eléctrico</i> .....	40
Capítulo 4.	Fabricación e implementación del control.....	46
4.1	Gestión De Compras (Procurement).....	46
4.2	Fabricación.....	46
4.2.1	<i>Armario eléctrico</i> .....	47
4.2.2	<i>Fabricación aditiva</i> .....	49
4.2.3	<i>Soldadura y crimpado de cables</i> .....	50
4.3	Montaje del prototipo.....	50
4.4	Modificaciones realizadas a la máquina fresadora.....	53
4.4.1	<i>Sustitución e instalación de nuevos finales de carrera</i> .....	53
4.4.2	<i>Sustitución del cableado</i> .....	54
4.4.3	<i>Sustitución de los conectores</i> .....	55
4.5	Montaje definitivo.....	56
4.6	Aspecto final.....	59
Capítulo 5.	Verificación del diseño.....	66
5.1	Diseño del ensayo.....	66
5.2	Realización del ensayo.....	68
5.3	Precisión teórica.....	73
5.4	Medidas realizadas.....	74
5.5	Cálculo del error de perpendicularidad.....	76
5.6	Resultados del ensayo.....	78

Capítulo 6. Viabilidad económica.....	80
6.1 Presupuesto.....	80
6.2 Alternativas al retrofit.....	81
6.2.1 <i>Mantener la maquina fuera de servicio</i> .....	82
6.2.2 Desechar la máquina.....	82
6.2.3 <i>Sustituir la máquina por una nueva</i> .....	82
Capítulo 7. Trabajos futuros.....	83
7.1 Elaboración de la documentación de la máquina.....	83
7.2 Ensayo de repetibilidad de la operación home.....	83
7.3 Ensayo de perpendicularidad y precisión en el eje Z.....	83
7.4 Mejora del sistema de sujeción.....	84
7.5 Extractor de polvo.....	84
7.6 Sonda para la longitud de herramienta.....	84
7.8 Mejora de los cobertores de los ventiladores.....	84
7.9 Variador de velocidad del motor fresador.....	85
7.10 Cerramiento de la máquina fresadora.....	85
7.11 Instalación de láser para corte y grabado.....	85
7.12 Ampliación del número de puertos USB.....	85
7.13 Ampliación del 4º eje.....	85
Capítulo 8. Conclusiones.....	86
Capítulo 9. Bibliografía.....	88
Anexo I. Esquema eléctrico del controlador.....	91
Anexo II. Plano de la pieza de verificación.....	93
Anexo III: Tabla de Excel para el ensayo de verificación.....	95

# Índice de Figuras

Figura 1: Placa de características del motor fresador. (Elaboración propia) .....	7
Figura 2: Motor fresador instalado en su brida y con una fresa en el portaherramientas. (Elaboración propia) .....	8
Figura 3: Detalle del plano de despiece de una fresadora de superficie. (13).....	9
Figura 4: Fresadora antes de comenzar el proyecto. (Elaboración propia) .....	10
Figura 5: Placa de características de la fresadora AutoGrav. (Elaboración propia) .....	10
Figura 6: Parte inferior de la fresadora. (Elaboración propia).....	11
Figura 7: Características del motor paso a paso. (Elaboración propia) .....	12
Figura 8: Detalle del cableado. (Elaboración propia) .....	14
Figura 9: Panel trasero del controlador original. (Elaboración propia) .....	15
Figura 10: Puerto USB del panel trasero del controlador antiguo. (Elaboración propia) ...	16
Figura 11: Puertos "Scanner" y "Tool measuring". (Elaboración propia).....	17
Figura 12: Bornes para refrigeración. (Elaboración propia) .....	17
Figura 13: Enchufe schuko. (Elaboración propia) .....	18
Figura 14: Ventilador. (Elaboración propia) .....	18
Figura 15: Conector XLR de 3 pines. (Elaboración propia) .....	19
Figura 16: Puertos serie. (Elaboración propia).....	20
Figura 17: Conector IEC C14 y fusible. (Elaboración propia) .....	20
Figura 18:Frontal del controlador. (20).....	27
Figura 19: Trasera controlador. (20).....	28
Figura 20: Trasera del controlador con el circuito impreso montado. (20) .....	28
Figura 21: Driver de motor paso a paso. (21) .....	30
Figura 22: Protecciones eléctricas instaladas. (Elaboración propia).....	32
Figura 23: Relés instalados. (Elaboración propia) .....	36
Figura 24: Esquema de la entrada de alimentación monofásica. (Elaboración propia) .....	40
Figura 25: Fragmento del esquema con relés y puesta en marcha. (Elaboración propia) ...	41
Figura 26:Fragmento del esquema con drivers de los motores paso a paso. (Elaboración propia) .....	43
Figura 27: Fragmento del esquema de conexión del PLC. (Elaboración propia).....	44
Figura 28: Fragmento del esquema con los ventiladores. (Elaboración propia) .....	45
Figura 29: Elementos montados sobre la placa galvanizada en el interior del armario eléctrico. (Elaboración propia).....	47
Figura 30: Diseño del panel frontal del controlador. (Elaboración propia).....	48
Figura 31: Soporte para final de carrera Y-. Impreso en PLA azul e instalado en su posición final. (Elaboración propia) .....	49

Figura 32: Detalle de punteras crimpadas. (Elaboración propia) .....	50
Figura 33: Montaje del prototipo del controlador. (Elaboración propia) .....	51
Figura 34: Croquis del elemento portalápices. (Elaboración propia).....	52
Figura 35: Dibujo realizado en la fresadora utilizando el portalápiz. (Elaboración propia)	52
Figura 36: Final de carrera X--. (Elaboración propia) .....	53
Figura 37: Comparativa de los cables. (Elaboración propia) .....	54
Figura 38: Conectores utilizados. (Elaboración propia).....	55
Figura 39: Imagen tomada durante el proceso de cableado de la máquina. (Elaboración propia) .....	57
Figura 40: Imagen tomada durante el proceso de ordenar los cables. (Elaboración propia)	58
Figura 41: Placa de montaje tras la instalación de todos sus elementos. (Elaboración propia) .....	59
Figura 42: Conexionado de la puerta del armario eléctrico. (Elaboración propia).....	60
Figura 43: Panel frontal del controlador. (Elaboración propia) .....	61
Figura 44: Panel superior del controlador. (Elaboración propia) .....	62
Figura 45: Panel lateral derecho del controlador. (Elaboración propia) .....	63
Figura 46: Controlador con la puerta abierta. (Elaboración propia) .....	64
Figura 47: Fresadora y controlador en su posición final. (Elaboración propia).....	65
Figura 48: Diseño de la pieza del ensayo en Fusion 360. (Elaboración propia) .....	67
Figura 49: Montaje para la realización del ensayo. (Elaboración propia) .....	69
Figura 50: Parte superior del tablero en el que se cortó la pieza del ensayo. (Elaboración propia) .....	70
Figura 51: Parte inferior del tablero en el que se cortó la pieza del ensayo. (Elaboración propia) .....	71
Figura 52: Detalle de la parte inferior de la pieza antes de limpiarla. (Elaboración propia)	72
Figura 53: Pieza de verificación una vez limpiada. (Elaboración propia) .....	72
Figura 54: Calibre utilizado. (Elaboración propia).....	74
Figura 55: Esquema que indica los números de las medidas en el Excel. (Elaboración propia) .....	75
Figura 56: Croquis para ilustrar los cálculos del ángulo de desviación. (Elaboración propia) .....	77

# Índice de tablas.

Tabla 1: Medidas del ensayo. (Elaboración propia) .....	75
Tabla 2: Resultados del error de posicionamiento en los ejes X e Y. (Elaboración propia) .....	78
Tabla 3: Desglose del coste de materiales. (Elaboración propia).....	81

## **Capítulo 1. Introducción.**

El rápido avance de la tecnología y la concienciación sobre reducir la cantidad de residuos producidos ha hecho que en la industria aparezca el término “Retrofit”, que podría traducirse al castellano como reacondicionamiento. El retrofit es una práctica que consiste en añadir nuevas tecnologías o funcionalidades a sistemas antiguos. Normalmente se centra en aumentar la eficiencia o cumplir nuevas normativas (1). El retrofit en procesos industriales mejora el rendimiento operativo y aumenta la vida útil de los equipos, reduciendo el impacto ambiental (2)

En este capítulo se tratarán cuáles son los motivos por los que se realiza un retrofit, así como las medidas que se deben tomar tras la realización de este. También se explicará que es una máquina fresadora y los tipos existentes.

### **1.1 Motivos para realizar un retrofit en máquinas o instalaciones industriales.**

Entre las diferentes causas que pueden llevarnos a realizar un retrofit o transformación de una máquina o instalación caben destacar:

- **Causas Legales:** A causa de una modificación de la legislación que afecte a la máquina. Los retrofit realizados en maquinaria habitualmente se deben a la necesidad de cumplir con nuevas normativas y mejorar el desempeño ecológico (3)
- **Causas económicas:** Optimización de consumos energéticos u optimización tiempos de fabricación. El análisis económico indica que, por lo general, la realización de un retrofit suele ser más efectiva en términos de coste-resultados que la sustitución completa de una máquina (4)

- **Causas de Obsolescencia:** La empresa fabricante de la máquina ha desaparecido y no se dispone de apoyo técnico de esta para resolver problemas. Además, pasados 10 años desde que se dejó de fabricar un modelo los fabricantes dejan de estar obligados a mantener un stock de repuestos. Es muy frecuente con los controles de las máquinas, que evolucionan rápidamente y que en poco espacio de tiempo resultan obsoletos. La práctica de retrofit en máquinas no solo mejora sus capacidades, sino que resuelve problemas al mejorar sistemas de control para cumplir con nuevos estándares tecnológicos (5).
- **Modificación de las condiciones de fabricación:** Modificación en el producto generado; se requieren condiciones de precisión más estrictas, aumentar la cadencia de fabricación, fabricación de componentes de mayor tamaño, necesidad de diferente temperatura o presión en el proceso; necesidad de acoplar a la instalación diferentes sistemas. El retrofit de máquinas CNC asegura que cumplen con requisitos de fabricación y mejora su capacidad para afrontar problemas de la demanda. (6).
- **Mejoras en la máquina o instalación** para mejorar la eficacia y eficiencia de esta o del proceso productivo asociado, como puede ser la conexión con otras máquinas o instalaciones y monitorización externa de la producción.
- **Condiciones de mantenibilidad y fiabilidad de la máquina o instalación:** Mejoras o modificaciones de la máquina /instalación si se detecta que una parte sufre un elevado número de averías o desgaste, que producen la parada de la máquina con la consiguiente parada de producción y sobregasto en mantenimiento. Modificaciones que faciliten la labor de mantenimiento o TPM (Total Productive Maintenance) como pueden ser accesos, visores o sondas para la monitorización de diversos parámetros (vibraciones, temperaturas, consumos, etc.).

- **Modificación por necesidad de traslado de la máquina o instalación en una nueva ubicación:** Modificaciones que se deben realizar al cambiar el emplazamiento de una máquina, bien por motivos de espacio o bien por otros motivos, como podrían ser las vibraciones.
- Existen otra serie de razones como pueden la accesibilidad a la máquina o instalación, razones de visibilidad, iluminación, balizamiento, corrosión, o incluso razones puramente estéticas.

## **1.2 Acciones necesarias una vez realizado el retrofit.**

Si la modificación es lo suficientemente importante y afecta a cambios en la estructura, control o elementos de seguridad de la máquina, es necesario (además de documentar detalladamente la modificación o mejora del retrofit) adecuarla a la reglamentación vigente siguiendo las premisas del RD 1215/97 de adecuación de máquinas o aplicando RD 1644/2008 (7) de 10 Octubre (directiva 2006/42/CE (8)) y RD 1435/1992 (9) (Directiva 89/392/CE (10)). Además, a partir de enero del 2027 entrará en vigor la directiva 2023/1230/CE (11) que sustituye a las anteriores 2006/42/CE y 73/361/CEE. Todo esto debería ser certificado por un organismo autorizado (OCA, Organismo de Control Autorizado de la comunidad de Madrid)

Además, se debe preparar la siguiente documentación:

- **Manual de la máquina:** Donde se detallan las modificaciones y agregaciones realizadas. Con las características de cada componente y conjunto. Debe ser acompañado por el manual inicial que recoge las características de los sistemas y elementos que permanecen inalterados.
- **Manual del Usuario:** Nuevo manual que recoge todas las pautas para manejar la máquina o instalación de forma segura y eficiente.

- **Manual de Mantenimiento:** Que recoge toda la actividad del Departamento de Mantenimiento para que la máquina o instalación trabaje correctamente y pueda repararse en caso de fallo o avería. Así como planos de conexión, diagramas de bloques, listado de repuestos, operaciones mantenimiento, productos a utilizar, etc.

### **1.3 Máquinas fresadoras.**

Una fresadora es una máquina herramienta versátil que se utiliza para mecanizar piezas sólidas mediante el arranque de material a través de una herramienta rotativa denominada fresa (12). Generalmente sirven para la creación de superficies planas, taladros, ranuras o perfiles complejos.

Existen varios tipos y formas de clasificarlas. Por su modo de operación podemos clasificarlas como manuales o de control numérico (CNC). Las fresadoras manuales son manejadas por el operario mediante manivelas que mueven los ejes. Son más sencillas en términos de diseño y operación que las fresadoras de control numérico, y para unas características similares, más económicas. Las fresadoras CNC son herramientas automatizadas. Las operaciones que se quieran realizar deben ser programadas. Permiten la creación de perfiles complejos, así como automatizar la producción.

Según su número de ejes, pueden clasificarse en:

- **2 ejes o 2 ejes y medio:** Son máquinas que permiten controlar el movimiento de 2 ejes (generalmente X e Y) y tienen el eje z fijo o con poca capacidad de regulación. Un ejemplo de este tipo de fresadora sería añadir una mesa de mecanizado, que permite el movimiento en el plano XY a un taladro de columna, que permite cambiar la altura del eje Z, pero sin apenas precisión.
- **3 ejes:** Son las más comunes. Permiten el movimiento en 3 ejes perpendiculares entre sí. Generalmente constan de una mesa que se mueve en los ejes X e Y, y un cabezal con la herramienta que se mueve en Z.

- **4 ejes o más:** Son fresadoras que además de poder moverse en 3 ejes perpendiculares, incluyen algún giro. Generalmente se trata de fresadoras CNC. Permiten la creación de geometrías tridimensionales muy complejas.

Las fresadoras también pueden clasificarse según su función. En inglés se utilizan dos términos diferentes. El término “milling machine” se utiliza para fresadoras orientadas al mecanizado de piezas, generalmente con un volumen de trabajo pequeño, con altas precisiones y para materiales metálicos. Por otro lado, utilizan el término “router” para referirse a fresadoras orientadas hacia el corte y grabado, con volúmenes de trabajo grandes y para materiales como madera, plásticos o aluminio, en formatos de gran superficie y pequeño espesor.

## **Capítulo 2. Estado de la cuestión.**

La máquina fresadora a la que se le va a realizar el retrofit es una fresadora tipo router, de tamaño medio, lo que permite que se instale sobre una mesa. Este tipo de fresadoras son utilizadas principalmente por centros educativos, para mostrar cómo se programa una máquina de control numérico, o por aficionados al bricolaje que desean fabricar piezas en casa. Está orientada principalmente al corte y grabado de maderas. Este tipo de fresadoras viene generalmente en dos módulos. Un módulo con la propia máquina, con todas sus partes mecánicas, y otro módulo formado por el controlador. En máquinas similares, pero de mayor tamaño, el controlador puede encontrarse integrado en la propia máquina.

La fresadora en cuestión es una AUTOGRAV AG III. Fue adquirida en 2007. Posteriormente la empresa fabricante cerró. Ha sido imposible encontrar información técnica acerca de la máquina y su control. Es por ello, que los datos mostrados a continuación surgen del análisis, la observación y medición de los elementos particulares que forman la máquina. El análisis se dividirá en dos bloques: la parte mecánica, fresadora y la parte eléctrico-electrónica, el controlador.

## 2.1 Fresadora.

En este capítulo, se describirán los elementos de la fresadora

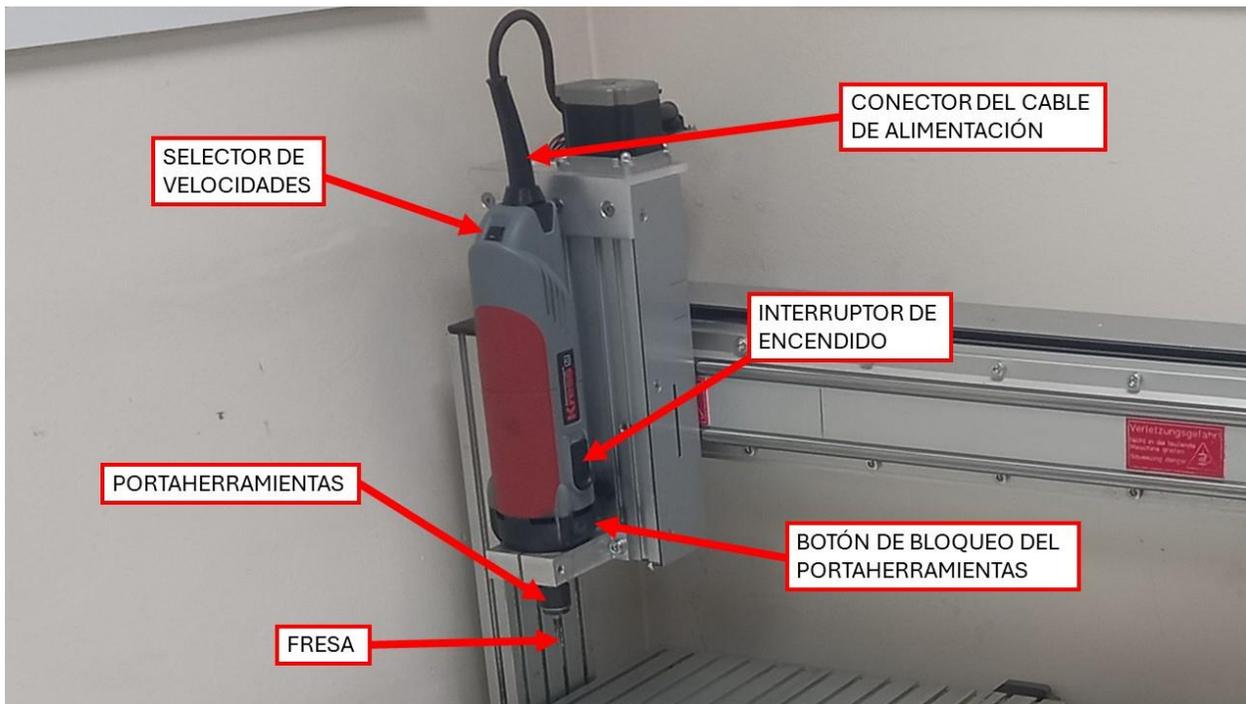
### 2.1.1 Motor fresador (spindle).

El motor fresador que emplea el conjunto es un Kress typ 1050-FME. Tiene una potencia nominal de 1050 W. Cuenta con un interruptor de encendido y apagado y un conector rápido para la alimentación monofásica de 220/230V AC, 50/60 Hz.



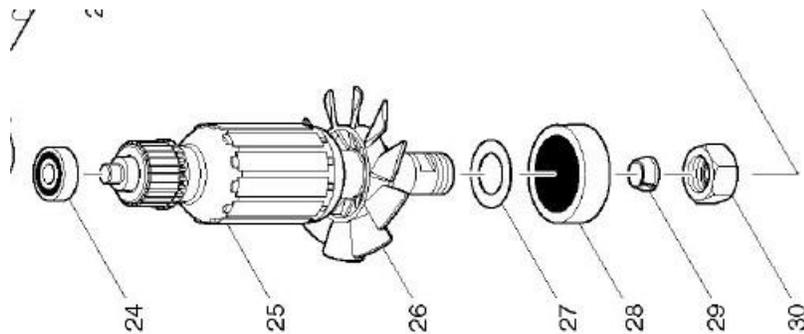
*Figura 1: Placa de características del motor fresador. (Elaboración propia)*

La velocidad de giro de la herramienta se puede variar de forma manual entre 10.000 y 32.000 rpm, utilizando un selector de velocidades en forma de rueda numerada, situado en la parte superior del motor fresador. El motor fresador se sujeta a la estructura de la fresadora utilizando una brida que lo sujeta por una parte cilíndrica situada en el inferior del motor fresador, de diámetro 43mm.



*Figura 2: Motor fresador instalado en su brida y con una fresa en el portaherramientas. (Elaboración propia)*

El portaherramientas consta de tres piezas: El portapinzas, la pinza de resorte ER y la tuerca de fijación. Estas piezas se pueden observar en la Figura 3 que consiste en un fragmento del plano de despiece de una fresadora de la marca MAKITA. El portapinzas corresponde a la marca 25 puesto que está integrado en el rotor. La pinza de resorte ER corresponde con la marca 29 y la tuerca de fijación es la marca 30.



*Figura 3: Detalle del plano de despiece de una fresadora de superficie. (13)*

### **2.1.2 Estructura.**

La estructura principal de la fresadora está fabricada en aluminio. Consta de una base plana de 800x600 mm con ranuras que permiten sujetar los materiales y piezas que se vayan a mecanizar. También tiene un puente que se puede mover de manera longitudinal a lo largo de toda la base. Dicho puente tiene montado una plataforma que aloja el motor fresador antes mencionado. Esta plataforma puede moverse tanto verticalmente como transversalmente a lo largo del puente. Las direcciones de los ejes se indica en la Figura 4. Las dimensiones del volumen de trabajo son de 590mm x 480mm x 90mm tal y como se indica en la placa mostrada en la Figura 5.



*Figura 4: Fresadora antes de comenzar el proyecto. (Elaboración propia)*



*Figura 5: Placa de características de la fresadora AutoGrav. (Elaboración propia)*

### **2.1.3 Guías y husillos.**

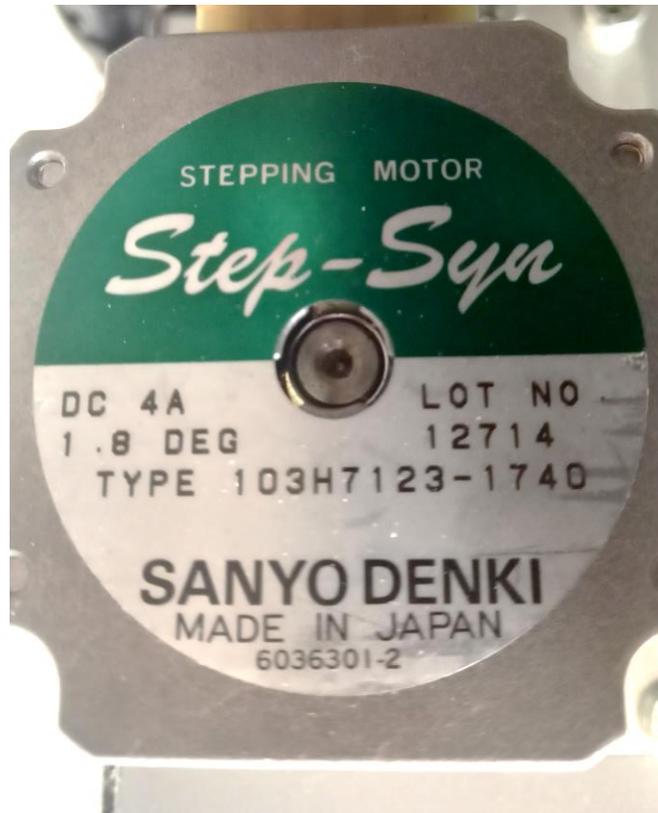
Los elementos móviles de la estructura van montados sobre guías de acero, y su movimiento se consigue haciendo girar husillos. Los husillos del eje correspondiente a la base (eje X) y a la dirección transversal del puente (eje Y) tienen una rosca trapezoidal Tr14x4. El husillo de la dirección vertical (eje Z) tiene una rosca de trapezoidal Tr7x2. No se ha encontrado información sobre las guías y rodamientos que utiliza. En la parte inferior de la máquina hay dos guías para el eje X. Cada guía cuenta con un rodamiento lineal de bolas. Los rodamientos disponen de engrasador para labores de mantenimiento. Los ejes disponen de topes mecánicos. En la Figura 6 se puede observar la parte inferior de la fresadora en la que se encuentran las guías y el husillo trapezoidal del eje X junto con parte del cableado. La imagen se tomó después de comenzar el proyecto, puesto que se puede ver el final de carrera del eje X+ y los cables nuevos



*Figura 6: Parte inferior de la fresadora. (Elaboración propia)*

### ***2.1.4 Motores paso a paso.***

Cada husillo es movido por un motor paso a paso SANYO DENKI TYPE 103H7123-1740 de 1.8 grados por paso y 4A de corriente nominal.



*Figura 7: Características del motor paso a paso. (Elaboración propia)*

### ***2.1.5 Finales de carrera mecánicos.***

La máquina tiene 3 finales de carrera, uno por eje. Se encuentran situados en el sentido negativo de cada eje, para poder realizar la operación de buscar el cero máquina.



*Ilustración 3: Final de carrera original de la máquina. (Elaboración propia).*

### ***2.1.6 Cableado.***

La máquina consta de 4 mangueras. Una de ellas es la manguera de alimentación monofásica de la fresadora, para 220V AC 1050W. Las otras tres son mangueras de cable apantallado con 8 núcleos de 0,25 mm<sup>2</sup> que alimentan los motores paso a paso. Parte de los cables de la manguera se utilizan para alimentar el final de carrera de su respectivo eje. Cada una de estas mangueras acaba en un conector serie de 9 pines.

En la Figura 8 se puede observar las conexiones de la manguera del motor paso a paso del eje X. Hay varios problemas.



*Figura 8: Detalle del cableado. (Elaboración propia)*

En primer lugar, si se compara el grosor del cable amarillo que sale de la manguera con el cable naranja que viene del motor, se observa que la diferencia de sección es notoria. Los cables de la manguera son de  $0,25 \text{ mm}^2$  mientras que los del motor son de  $0,50 \text{ mm}^2$ . La normativa indica que no deben realizarse cambios de sección en alimentaciones (14)

En segundo lugar, el código de colores es caótico, los cables azul y rojo de la manguera no están soldados a los cables azul y rojo del motor, sino que se conectan a un final de carrera y se utilizan los cables marrón y verde para conectar con el motor.

Por último, la toma de tierra se realiza mediante los cables rosa y gris de la manguera que están soldados junto con el apantallamiento al punto de la toma de tierra de la máquina. Usar

el apantallamiento como conductor no está permitido según la normativa. Además, para un correcto funcionamiento del apantallamiento, este debe conectarse a tierra solo por uno de sus extremos.

## 2.2 Controlador.

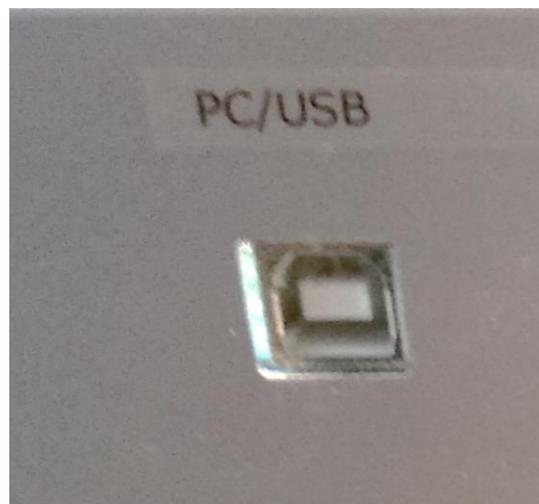
En el momento de inicio de este trabajo, el controlador se encontraba desmontado y puede que sin todos sus componentes. Se han conseguido imágenes de antes de ser desmontado y se deducirán sus elementos y funciones a partir de ellas. Además, los rótulos de las pegatinas están en inglés y la normativa (15) exige que los rótulos estén en el idioma del usuario.



*Figura 9: Panel trasero del controlador original. (Elaboración propia)*

### **2.2.1 Puerto USB.**

Puerto USB tipo B usado para conectar el control a un ordenador. La falta de pantalla, puertos para algún tipo de almacenamiento de archivos o controles más allá de unos botones que parecen ser de encendido y apagado hacen suponer que este controlador debía estar constantemente conectado a un ordenador para recibir instrucciones y poder operar.



*Figura 10: Puerto USB del panel trasero del controlador antiguo. (Elaboración propia)*

### **2.2.2 Puertos para sondas.**

Hay dos puertos con conectores tipo DIN de 5 pines y etiquetados como “Scanner” y “Tool Measuring”. No está muy claro la función del scanner. Algunas hipótesis son que permitía conectar un escáner para monitorear la forma y el desgaste de la herramienta o un escáner que permitiese monitorear la superficie de trabajo. Por otro lado, se cree que “Tool measuring” permitía conectar una sonda para medir la longitud de la herramienta utilizada y así facilitar la colocación del cero del eje z sobre la superficie a mecanizar.



*Figura 11: Puertos "Scanner" y "Tool measuring". (Elaboración propia)*

### **2.2.3 Bornes 24V.**

Hay dos bornes etiquetados como “Cooling 24V”. Se cree que tenían la función de conectar una pequeña bomba para refrigerar el motor fresador. También puede que fueran utilizados para conectar un relé externo que controlara por ejemplo la lubricación o la aspiración de virutas.



*Figura 12: Bornes para refrigeración. (Elaboración propia)*

### **2.2.4 Enchufe schuko.**

Un enchufe schuko con la etiqueta “Spindle 240V~”. Sirve para conectar la manguera de alimentación del motor fresador.



*Figura 13: Enchufe schuko. (Elaboración propia)*

### **2.2.5 Ventilador.**

Un ventilador para disipar el calor generado por los componentes electrónicos del interior del controlador.



*Figura 14: Ventilador. (Elaboración propia)*

### ***2.2.6 Conector XLR de 3 pines.***

Conector XLR de 3 pines con seguro de desconexión. No dispone de ninguna etiqueta con información sobre su aplicación. Este tipo de conector se utiliza en aplicaciones de control industrial para alimentación de bajo voltaje y señales de control. Se cree que en este caso servía para conectar una seta de seguridad externa.



*Figura 15: Conector XLR de 3 pines. (Elaboración propia)*

### ***2.2.7 Puertos serie de 9 pines.***

Hay tres puertos serie de 9 pines con las etiquetas “-Z-“, “-Y-“, “-X-“. Sirven para conectar las mangueras de los motores paso a paso de la fresadora.



*Figura 16: Puertos serie. (Elaboración propia)*

### **2.2.8 Toma de alimentación.**

Una toma de alimentación que consta de un conector IEC C14 macho que permite conectar el control a una alimentación monofásica con fase neutro y tierra. También incluye un fusible desmontable en su parte superior, para proteger la instalación frente a sobretensiones. No se ha encontrado el fusible por lo que no se tiene información sobre él.



*Figura 17: Conector IEC C14 y fusible. (Elaboración propia)*

## **Capítulo 3. Diseño del control.**

Debido a que el controlador anterior es inservible, se va a diseñar un controlador nuevo para la fresadora. En este capítulo se discutirá la metodología del diseño, los criterios de diseño y las funcionalidades que debe tener el controlador. Así mismo se enunciarán los elementos necesarios para un controlador con las características deseadas y se discutirán los componentes seleccionados. Por último, se explicará el conexionado del controlador.

### **3.1 Metodología.**

Para diseñar y posteriormente montar el controlador se ha recopilado información de varias fuentes. En primer lugar uptimefab.com es un blog escrito por un ingeniero mecánico que lleva a cabo proyectos a modo de hobby. En 2021 escribió un artículo (16) en el que detalla como modificó el controlador de una fresadora de sobremesa que tenía en casa para poder operar la fresadora sin necesidad de conectar un ordenador. Este artículo ha servido de guía e inspiración para comenzar este proyecto, ya que el artículo está muy bien documentado con listas de materiales, instrucciones, vídeos y consejos para montar el controlador.

Por otro lado, a la hora de convertir un proyecto de hobby en un trabajo científico, se ha tomado como referencia 3 artículos de la universidad politécnica de california en los que se lleva a cabo el reacondicionamiento de un torno CNC. En estos artículos definen el objetivo del retrofit (17), el diseño para cumplir las especificaciones (18) y finalmente la implementación del diseño y últimas modificaciones que se han realizado al diseño, junto con los ensayos realizados a la máquina (19).

Basándonos en esta información se ha decidido en primer lugar elegir cuáles serán las funcionalidades de la máquina, así como las directrices a seguir a la hora de realizar el diseño. En capítulos posteriores se tratará la fabricación e implementación del controlador, así como la verificación de la máquina.

### **3.2 Funcionalidades.**

El nuevo control debe tener las siguientes funcionalidades:

- **Capacidad para trabajar fuera de línea:** El control original de la máquina no dispone de ningún microprocesador, por lo que, para operarlo, debía estar conectado en todo momento a un ordenador. Originalmente se pensó en que el nuevo controlador tuviera tanto la opción de estar conectado a un ordenador, como la de cargar piezas desde una memoria USB. Esta idea se descartó ya que la diferencia de precio era elevada (de unos 150€) y se consideró que no era una función a la que se le fuera a dar tanto uso. Es por ello por lo que finalmente se ha elegido un PLC que únicamente puede cargar archivos desde una memoria USB.
- **Capacidad para mover la herramienta en 3 ejes:** Al igual que el control original, el nuevo control debe ser capaz de mover los tres ejes de la máquina.
- **Capacidad para poner en marcha y parar el motor fresador:** Al igual que el control original, el nuevo control debe ser capaz de poner en marcha y parar la fresadora.
- **Capacidad de recibir y enviar señales:** Funcionalidad utilizada para recibir información de finales de carrera o para accionar relés.
- **Capacidad para realizar la operación “Home”:** Operación que consiste en localizar la posición “cero máquina” para fijar un sistema de referencia.

## 3.2 Elementos de seguridad.

El diseño del nuevo control también ha tenido en cuenta los siguientes criterios de seguridad:

- **Función de parada de emergencia:** El nuevo control debe incluir una seta de seguridad cuyo accionamiento detenga el movimiento de los ejes y del motor fresador.
- **Obligatoriedad de pulsar el botón de marcha para permitir el movimiento de la máquina:** Es decir, que si por algún motivo se para la máquina, solo puede volver a funcionar si se pulsa el botón de marcha.
- **Conexión a tierra de todos los elementos.**
- **Interruptor de la herramienta:** Que permite poner en marcha o parar el motor fresador desde el mismo cuadro.
- **Protecciones eléctricas:** Que incluyen un interruptor diferencial automático y un interruptor magnetotérmico.

## 3.3 Otros criterios de diseño.

A continuación, se describen una serie de criterios que también se han tenido en cuenta a la hora de diseñar el control y elegir sus componentes.

### 3.3.1 *Diseño modular.*

Un diseño modular quiere decir que el sistema se divide en componentes individuales o módulos independientes. Cada uno de estos componentes cumple una funcionalidad y puede ser montado, reemplazado o modificado de manera independiente. El control ha de diseñarse de manera modular, ya que permite las siguientes ventajas (20):

- **Sustitución de elementos obsoletos o dañados:** En un diseño modular, al existir independencia en los componentes resulta sencilla la sustitución de estos.

- **Fácil limpieza y mantenimiento:** En un sistema modular resulta más sencillo identificar fallos en los componentes, ya que pueden ser aislados, desmontados o probados por separado.
- **Flexibilidad para modificar o ampliar las capacidades del control:** Del mismo modo que resulta sencillo sustituir un elemento dañado, también es sencillo sustituir un elemento para cumplir con nuevas necesidades o especificaciones.

### ***3.3.2 Criterio económico.***

Es importante adecuar los componentes que se vayan a utilizar en el control al uso y las prestaciones que se esperen de ellos. Los elementos utilizados también han de ser fiables.

### ***3.3.3 Criterio ecológico.***

Uno de los puntos a favor de la implementación del retrofit es el cuidado del medioambiente. El retrofit permite reutilizar componentes en lugar de utilizar componentes nuevos. Esto también es un criterio económico ya que ahorra el coste de nuevos componentes. Los elementos que se pueden reciclar con mayor facilidad son:

- Cables.
- Conectores.
- Interruptores.
- Fuentes de alimentación.
- Ventiladores.
- Protecciones eléctricas.

Además, en este caso, al tratarse de una máquina de 2007, el nuevo control será más eficiente. Esto permite ahorrar energía.

### ***3.3.4 Criterio de simplicidad.***

A la hora de diseñar un elemento, se procurará hacerlo de la forma más simple posible, para ahorrar tiempo de diseño y facilitar su fabricación. Esto también contribuye al criterio económico, ya que reduce el costo de los elementos.

### ***3.3.5 Criterio de mantenibilidad.***

El control debe diseñarse de forma que sea fácil de mantener. Deben existir repuestos, componentes con acceso a un servicio técnico y buena documentación y siempre que sea posible se deben utilizar elementos estándar o normalizados. También es importante tener acceso al software de los elementos que lo requieran para trabajar.

## **3.4 Diseño final.**

Una vez conocidas las funcionalidades y elementos de seguridad que se deben incluir en el diseño junto con los criterios elegidos, se puede comenzar a diseñar el control. No obstante, se cree conveniente explicar los elementos fundamentales y su función en el control:

- **PLC:** de sus siglas en inglés “Programmable Logic Controller”. Es la parte más importante del control. El controlador lógico programable se encarga de procesar información y enviar ordenes al resto de elementos.
- **Drivers para motores paso a paso:** Son elementos electrónicos que convierten señales eléctricas en pulsos eléctricos que mueven los motores paso a paso.
- **Fuentes de alimentación:** La electrónica del controlador funciona con corriente continua, mientras que lo comúnmente accesible, por ejemplo, en el enchufe de la pared, es corriente alterna. Es por esto por lo que, se necesitan fuentes de alimentación, que transforman corriente alterna en continua, además de regular el voltaje.

- **Protecciones eléctricas:** Sirven para proteger tanto a componentes como a usuarios del controlador. Existen varios tipos, pero las más comunes y las que se van a usar en este caso son los interruptores magnetotérmicos, que cortan la corriente cuando esta supera un cierto valor, y los interruptores diferenciales, que cortan la corriente cuando detectan una derivación a tierra.
- **Interruptores y pulsadores:** Sirven para controlar mediante el accionamiento mecánico manual el paso de corriente por cable eléctricos. Se pueden usar para enviar señales eléctricas, o para permitir la alimentación de una máquina.
- **Relés:** Al igual que un interruptor, permiten o cortan el paso de corriente, pero a diferencia de los interruptores o pulsadores, se controlan con electricidad. Esto permite, por ejemplo, controlar la alimentación de una toma de 220V AC utilizando una salida de 24V DC del PLC.
- **Conectores:** Permiten una conexión eléctrica temporal que es fácil y rápida de montar o desmontar. Existen infinidad de tipos de conectores. Los parámetros más importantes son la tensión e intensidad que soporta, así como el número de conexiones eléctricas que tienen.
- **Ventiladores:** Permiten disipar calor. Son importantes ya que hay componentes electrónicos de potencia y microprocesadores.
- **Armario eléctrico:** Es importante tener todos los elementos del control en un lugar cerrado, para protegerlos así del polvo, impactos o derrames. El armario eléctrico debe tener espacio suficiente para alojar todos los componentes, así como para permitir una adecuada refrigeración de estos. También es importante adecuar el tamaño del armario para dejar espacio libre, que se puede utilizar para ampliar o sustituir elementos. Además, facilita el montaje y mantenimiento.
- **Cables eléctricos:** Los cables eléctricos son los encargados de conducir señales y potencia eléctrica. Los parámetros para tener en cuenta son la sección del conductor y el aislamiento que debe cumplir con la tensión y ser libre de halógenos.

### **3.4.1 Elección de componentes.**

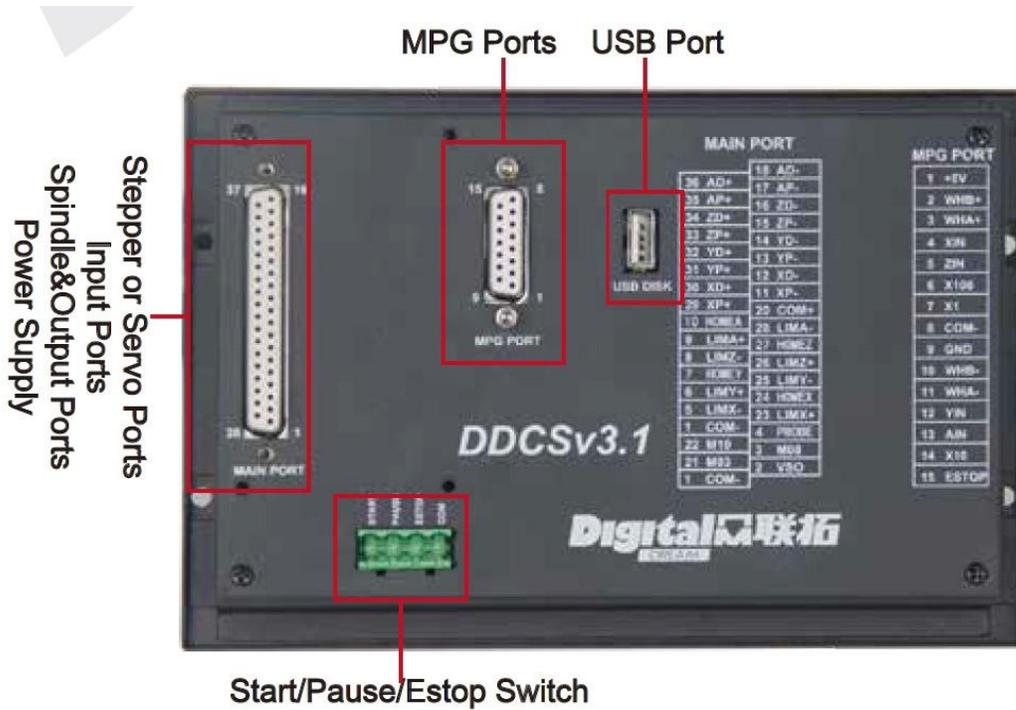
Conociendo las partes fundamentales de un control, se procede a elegir los componentes que formarán el nuevo controlador.

#### **3.4.1.1 PLC.**



*Figura 18: Frontal del controlador. (21)*

Para el “cerebro” de la máquina se ha optado por un DDCS v3.1 para 4 ejes. Es un PLC de la empresa china Digital Dream que lo anuncia como un controlador para máquinas CNC. El PLC se entrega ya programado y listo para funcionar una vez se conecten los cables. Además, viene integrado en un panel con pantalla y botones en el frontal y los puertos para las conexiones en la trasera. También se incluía un circuito impreso con clemas para facilitar la conexión de cables.



*Figura 19: Trasera controlador. (21)*



*Figura 20: Trasera del controlador con el circuito impreso montado. (21)*

Cuenta con una buena documentación y su bajo precio lo ha convertido en una opción popular, por lo que existen foros y comunidades en internet en las que encontrar información y resolver problemas.

En el momento de la compra había más alternativas de la misma marca. Existe el mismo modelo, pero en la versión de 3 ejes y el modelo 4.1 que incluye conectividad con un ordenador a través de un puerto ethernet. Se optó por el modelo V3.1 en la versión de 4 ejes ya que el precio era muy similar al de 3 ejes y la disponibilidad era mejor. Además, tener la posibilidad de controlar un cuarto eje permite en el futuro instalar un cuarto eje rotativo o implementar otra función que requiera de controlar un motor paso a paso. Por otro lado, el modelo v4.1 era más caro y se consideró que la funcionalidad de conectar un ordenador no iba a tener mucho uso.

### 3.4.1.2 Drivers para motores paso a paso.



Figura 21: Driver de motor paso a paso. (22)

Como drivers para los motores paso a paso se ha optado por el DM 556 por los siguientes motivos:

- Permite regular la corriente de pico, desde 1,4 hasta 5,6 A de pico. Lo que queda dentro del rango de 4A de corriente nominal de los motores paso a paso SANYO DENKI TYPE 103H7123-1740 que están montados en la fresadora.
- Permite regular el número de micropasos admitiendo en su configuración 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 5, 10, 20, 25, 40, 50, 100 y 125 micropasos.
- Se monta y desmonta fácilmente sobre cualquier superficie con dos tornillos.

- Incluye conectores con clemas para atornillar los cables, que es un sistema cómodo ya que no hay que soldar ni crimpar cables y se pueden montar y desmontar rápidamente.
- Contiene toda la información impresa en el dorso, desde que cable va a cada terminal, hasta las posiciones de los interruptores para cada configuración de intensidad y micropasos.

### **3.4.1.3 Fuentes de alimentación.**

Los elementos que necesitan de una fuente de alimentación son: el PLC que se alimenta a 24V DC y los drivers de los motores que se pueden alimentar entre 20 y 50 V DC.

Para la alimentación de 24V DC se han seleccionado dos fuentes Meanwell MDR-20-24, cada una de ellas capaz de producir 24V 1A y preparadas para montar sobre carril DIN. El uso de dos fuentes independientes en lugar de una sola fuente más potente se debe a que así lo recomienda el fabricante del PLC en el capítulo 2.6.4 del manual, en el que se indica que necesita una fuente para alimentar el sistema y otra independiente para alimentar los puertos de entrada y salida (finales de carrera, relés, etc.).

Para la alimentación de los drivers de los motores se ha seleccionado una fuente de 48V DC 600W. Pese a que habría sido posible alimentar los drivers de los motores también a 24V, se decidió hacerlo a 48V porque, de esta manera, los motores pueden tener más par, soportando así mayores aceleraciones y minimizando la pérdida de pasos.

### **3.4.1.4 Protecciones eléctricas.**

El objetivo de las protecciones eléctricas que se instalarán en la máquina es salvaguardar la instalación contra sobrecargas, cortocircuitos y derivaciones a tierra, asegurando así la seguridad operativa y la integridad de los equipos. Para cumplir con este objetivo, se han seleccionado un interruptor automático magnetotérmico y un interruptor automático diferencial.



*Figura 22: Protecciones eléctricas instaladas. (Elaboración propia)*

- Interruptor automático magnetotérmico: El interruptor automático magnetotérmico seleccionado protege la instalación contra sobrecargas y cortocircuitos. Se ha optado por un interruptor de 1P+N (1 polo + neutro) de 10A, con curva tipo C para montaje en carril DIN de la marca EATON modelo PLG-C10/1N. Un interruptor 1P+N desconecta tanto el conductor de fase como el neutro, garantizando la desconexión completa del circuito en caso de fallo, lo cual es crucial en sistemas monofásicos para prevenir posibles accidentes eléctricos. Además, en instalaciones monofásicas típicas, como las domésticas, no siempre es posible identificar con precisión cuál es el polo de fase y cuál es el neutro, lo que hace que la desconexión de ambos polos sea una medida de seguridad recomendada.

Se ha seleccionado un interruptor de 10A basado en el cálculo de la carga total de la instalación. La fresadora tiene un consumo máximo de 1050W, las fuentes de

alimentación de 24V consumen 48W y la fuente de alimentación de 48V consume 600W, totalizando 1700W. Suponiendo un factor de potencia de 0,8 y una tensión monofásica de 230V AC, aplicando la fórmula  $I = \frac{P}{V \cdot \cos\phi}$  se obtiene una corriente aproximada de 9,2A. Para evitar disparos no deseados y teniendo en cuenta que la estimación es conservadora, el interruptor de 10A es adecuado, proporcionando un margen de seguridad adicional.

La elección de un interruptor con curva tipo C se justifica porque es adecuado para aplicaciones que involucran picos de corriente moderados, como los motores y transformadores que componen la carga de esta instalación. La curva tipo C ofrece una protección equilibrada y es ideal para este tipo de equipos, que pueden experimentar corrientes de arranque elevadas. Además, este tipo de interruptor es el más utilizado en aplicaciones industriales y domésticas, lo que lo hace más accesible y económico.

- La función del interruptor automático diferencial es proteger la instalación contra derivaciones a tierra, que pueden ser peligrosas tanto para la instalación como para los usuarios. Se ha seleccionado un interruptor diferencial de 1P+N de 25A con disparo a 30mA de la marca EATON, modelo PXF-25/2/003-A. La elección de un interruptor diferencial 1P+N se justifica por los mismos motivos que el interruptor magnetotérmico: garantiza la desconexión de ambos polos, lo que cumple con las recomendaciones y normativas europeas de seguridad eléctrica. El disparo a 30mA es adecuado para la protección contra contactos directos e indirectos, de acuerdo con la normativa europea EN 61008-1 (23), que establece 30mA como el umbral estándar para la protección de las personas contra descargas eléctricas.

Se ha optado por un interruptor diferencial de 25A porque esta corriente nominal es más que suficiente para cubrir la demanda eléctrica del sistema, proporcionando un

margen amplio para posibles aumentos de carga. Además, el coste de un interruptor de 25A es considerablemente menor que el de uno de menor capacidad, y la corriente nominal no influye en la protección efectiva contra fugas de corriente a tierra, que es la principal función del dispositivo, cuyo disparo está configurado a 30mA.

#### **3.4.1.5 Interruptores y pulsadores.**

El objetivo de los interruptores y pulsadores es permitir o evitar el paso de corriente mediante el accionamiento mecánico de elementos. Por ello es necesario a la hora de seleccionarlos, prestar atención a la intensidad máxima admitida. En el caso de los pulsadores, también es importante conocer si son pulsadores normalmente abiertos o cerrados para diseñar el esquema de conexiones eléctricas en consecuencia.

- **Interruptor general:** Permite o corta la alimentación monofásica de todo el sistema. Se ha seleccionado un interruptor giratorio de levas con dos posiciones, tres polos y corriente nominal 25A. Se ha elegido de 25A ya que es una corriente nominal superior a 10A, que es el máximo que admite la máquina por protecciones. El interruptor general está “aguas arriba” de las protecciones por lo que no está protegido. Aunque un interruptor de 10A habría sido suficiente, no había disponibilidad en el momento de la compra. Se ha elegido un interruptor de 3 polos para poder dejar la máquina completamente aislada, conexión de tierra incluida. Este interruptor es cerrojable, es decir, permite ser bloqueado con un candado para evitar el uso no autorizado de la máquina.
- **Pulsadores de marcha y paro:** Es un dispositivo que consta de dos pulsadores, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado. Su correcta conexión junto con un relé permite alimentar o cortar la alimentación de un sistema. Es más complejo que poner un interruptor de encendido y apagado, pero tiene la ventaja de que una vez parada la máquina, será necesario pulsar el botón de encendido para volver a ponerla en marcha.

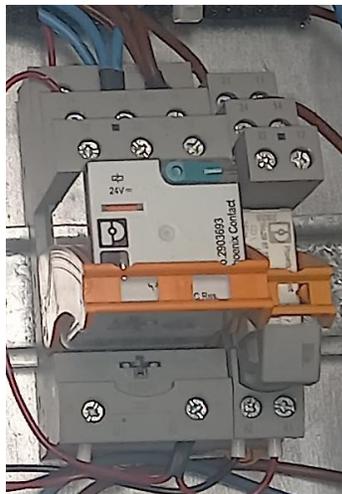
- **Seta de seguridad o botón de emergencia:** Es un elemento de seguridad que consiste en un botón rojo, de gran tamaño y que debe situarse en un lugar visible y de fácil acceso, pensado para cortar la corriente del sistema en caso de emergencia. Al pulsarlo, queda accionado hasta rearmarse. Para este proyecto se ha reutilizado una seta de seguridad perteneciente a un control CNC antiguo de Mitsubishi. Consta de un actuador y pulsadores desmontables, lo que permite un cierto grado de configuración. Para esta aplicación, se ha montado un pulsador normalmente abierto y otro normalmente cerrado. El normalmente cerrado es el encargado de cortar la corriente del sistema al accionarse, mientras que el normalmente abierto sirve para enviar una señal al PLC y que este sepa que ha entrado en parada de emergencia.
- **Conmutador de 3 posiciones:** Es un conmutador de ABB modelo 18155 que estaba suelto por el taller. Su función es controlar el modo de funcionamiento del motor fresador. En la posición 0, el motor fresador estará siempre parado. En la posición 1-Auto, el motor fresador será controlado por un relé que se activa con el comando M3 y M4 del PLC, por lo que se puede programar cuando funciona y cuando no. En la posición 3-Manual el motor fresador estará siempre encendido y girando, siempre y cuando el sistema esté alimentado.

#### **3.4.1.6 Relés.**

En la instalación se usan dos relés distintos, pero ambos cuentan con una bobina accionada a 24V, están protegidos por un amortiguador de diodo son capaces de cortar 10A a 250V, y están preparados para montarse sobre carril DIN. La diferencia es que uno de ellos es un relé de tres polos y el otro es de solo dos. El relé de 3 polos es de la marca Phoenix Contact Modelo 2903300. Se usa, junto con los botones de marcha y paro, para controlar la alimentación de la fuente de 48V y permitir que haya tensión en la toma de corriente a la que se conecta el motor fresador. El relé de 2 polos es de la marca Phoenix Contact, modelo 2903350. Este relé es accionado por el PLC con los comandos M03 y M04 y, si el conmutador está en la posición 1-Auto, permite la alimentación de la toma de corriente a la que se conecta

el motor fresador. Se han seleccionado relés accionados a 24V ya que es la tensión a la que trabaja el PLC. Se han incluido amortiguadores de diodo para evitar picos de tensión que pudieran dañar componentes electrónicos. El relé controlado por los botones de marcha y paro es de tres polos ya que debe conectarse la fase, el neutro y un cable de 24V DC. El relé controlado por el PLC se seleccionó pensando en cortar fase y neutro, pero en la práctica no es así ya que el conmutador es de un solo polo, por lo que solo puede cortar o la fase o el neutro. En este caso, se decidió cortar la fase.

Cada relé va montado sobre un porta relés que permite la sustitución de estos en caso de fallo o avería.



*Figura 23: Relés instalados. (Elaboración propia)*

### **3.4.1.7 Conectores.**

El controlador está provisto de varios conectores con distintas funciones. Algunos son para transmitir señales y otros para alimentar circuitos:

- **Conector IEC C14 macho:** Es un conector con tres pines que se utiliza para conectar un cable de alimentación monofásico con fase neutro y tierra. Está diseñado para operar con tensiones de hasta 250V y corrientes de hasta 10A. El conector utilizado se obtuvo (canibalizó) del despiece de una máquina estropeada. Está situado en el panel derecho y permite conectar un cable de alimentación para alimentar la máquina.
- **Conector schuko hembra:** Es un conector de tres pines que se utiliza para conectar un cable de alimentación. Está diseñado para operar con tensiones de hasta 250V y corrientes de 16A. Originalmente se barajó la idea de reutilizar el conector que venía en el controlador original, pero al no encontrarse en las mejores condiciones se optó por adquirir uno nuevo con tapa para protegerlo del polvo. Está colocado en el panel derecho del controlador. Su tensión está controlada por el relé de dos polos y el conmutador. A este elemento se conecta el cable de alimentación del motor fresador.
- **Conectores GX16 de 5 pines:** Son conectores de 5 pines. Admiten tensiones de hasta 250V e intensidades de 5A por pin. Proporcionan conexiones robustas al asegurarse el conector con una tuerca. De este conector también hay que destacar que tiene un IP 55, por lo que está protegido del polvo y chorros de agua en cualquier dirección. Estos conectores se usan para alimentar los motores paso a paso, hay tres y están situados en el panel superior del controlador.
- **Conector DB9 hembra:** Es un conector para enviar señales de baja tensión y corriente. Se adquirió uno con clemas para poder atornillar los cables en lugar de soldarlos. Se utiliza para conectar las señales de los finales de carrera y se encuentra en la parte superior del controlador.
- **Conector DB15 hembra:** Es un conector para enviar señales de baja tensión y corriente. La finalidad de este conector en el controlador es poder conectar un MPG (Manual Pulse Generator). El conector original se encuentra en la parte trasera del PLC que con el armario cerrado no es accesible. Por ello se adquirió un cable a modo de extensión de este conector y se ha colocado en el panel superior del controlador.

#### **3.4.1.8 Ventiladores.**

Se van a utilizar dos ventiladores para ayudar a disipar el calor generado en el interior del controlador. Uno de ellos se situará en la parte derecha del panel inferior y aspirará aire desde el exterior hacia el interior del controlador. El otro ventilador se sitúa en la parte superior del panel izquierdo e impulsa el aire hacia fuera del controlador. Ambos ventiladores han sido canibalizados de máquinas desguazadas. Uno de ellos era de menor tensión por lo que se le tuvo que soldar una resistencia en serie para evitar quemarlo.

#### **3.4.1.9 Armario eléctrico.**

Se ha seleccionado un armario eléctrico de la marca Ralertreik de dimensiones 400x500x240 fabricado en ABS y con una placa de montaje en acero galvanizado. Se ha seleccionado un armario de grandes dimensiones para poder tener los cables ordenados, que el montaje final sea estético y que quede espacio libre en el caso de que se desee ampliar el controlador en el futuro. El material elegido es ABS ya que facilita el crear agujeros en la superficie de la caja para posteriormente instalar pantallas, conectores y botones. Se ha seleccionado un armario con placa de montaje galvanizada para facilitar las conexiones a tierra.

#### **4.4.1.10 Cables eléctricos.**

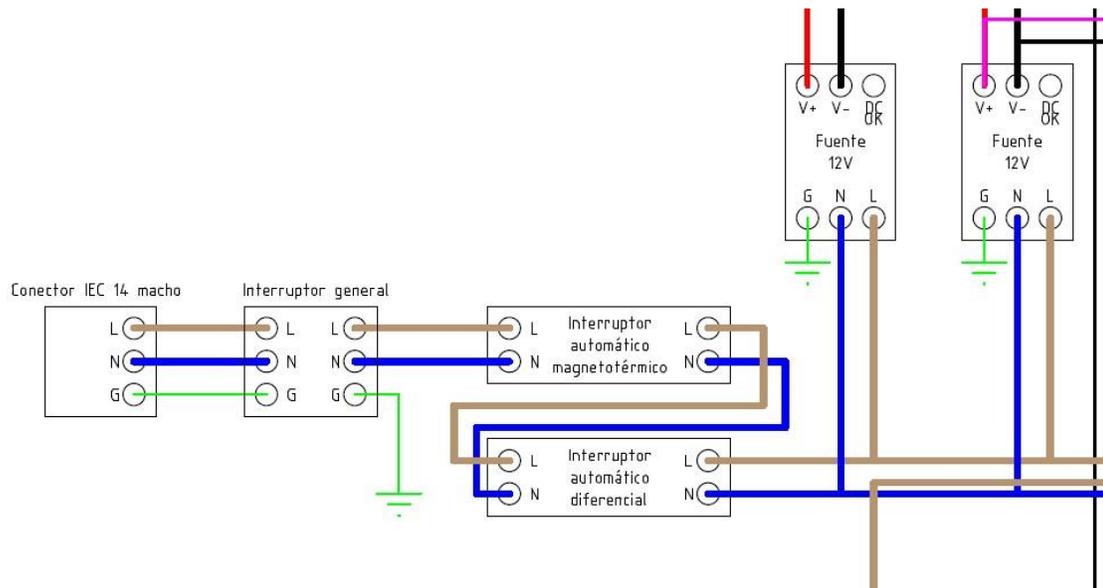
Dentro del controlador hay conexiones eléctricas muy distintas, es por ello por lo que se van a utilizar distintos tipos de cables.

- **Cables para corriente alterna:** Todos ellos son cables que van a transmitir potencia. Por ello se ha seleccionado cable flexible de sección 1,5 mm<sup>2</sup> con aislamiento eléctrico hasta 1000 V y libres de halógenos (En caso de incendio, no liberan gases tóxicos). Se utilizará el cable de color marrón para identificar la fase y el de color azul para identificar el neutro. Estos cables son comunes en instalaciones eléctricas, por lo que había en el taller y no fue necesario comprarlos.

- **Cables de alimentación en corriente continua:** Son cables que alimentan componentes electrónicos. Se ha seleccionado un cable plano con dos conductores de color rojo y negro, sección  $1,5 \text{ mm}^2$  con aislamiento hasta 1000V y libres de halógenos. Se utilizará el conductor rojo para identificar V+ y el negro para V- o GND. Se utilizaron cables que estaban disponibles en el taller.
- **Cables para señales de 24V:** Son cables que van a trabajar a 24V DC y con intensidades pequeñas (principalmente para accionar los relés). Se ha seleccionado un cable de  $0,5 \text{ mm}^2$  con aislamiento eléctrico hasta 750V. Se utilizará el color rojo para identificar V+ y el negro para V- o GND. Se utilizaron cables que estaban disponibles en el taller.
- **Manguera para señales:** Se va a utilizar para enviar las señales desde el PLC hasta los drivers de los motores paso a paso. Es una manguera de 4 conductores de colores rojo, azul, amarillo y blanco. Los conductores son de sección  $0,15 \text{ mm}^2$ . Esta manguera se reutilizó de un proyecto anterior.
- **Manguera de alimentación de los motores paso a paso:** Es la misma manguera que se utiliza para alimentar los motores paso a paso en la fresadora. Cuenta con 5 conductores de sección  $0,5 \text{ mm}^2$ . Uno de estos conductores es de color verde-amarillo, y se utilizará como cable de tierra. Esta manguera está apantallada para evitar interferencias electromagnéticas en otros conductores.
- **Manguera para los finales de carrera:** Se ha decidido reutilizar un trozo de la manguera que alimentaba los motores paso a paso. Es una manguera apantallada con 8 conductores de sección  $0,25 \text{ mm}^2$ .
- **Conexiones a tierra:** Además del conductor verde-amarillo de la manguera apantallada, se utilizará cable verde-amarillo de  $1,5 \text{ mm}^2$  con aislamiento eléctrico hasta 1000V y libre de halógenos para realizar la conexión a tierra del resto de componentes.

### 3.4.2 Conexión eléctrica.

El plano con el esquema de las conexiones eléctricas completo se adjunta en los anexos. A continuación, se procede a describir el conexionado eléctrico apoyándose en imágenes sacadas del esquema eléctrico antes mencionado.



*Figura 24: Esquema de la entrada de alimentación monofásica. (Elaboración propia)*

En la Figura 24 se muestra un fragmento del esquema eléctrico. En él se puede apreciar la entrada de alimentación monofásica al sistema. Después del conector se encuentra el interruptor general, que permite dejar la máquina completamente aislada de la red eléctrica. La toma a tierra de la red se conecta mediante un cable amarillo-verde a la placa de montaje galvanizada que hace de conexión de tierra para todo el cuadro. Tras el interruptor se encuentran las protecciones eléctricas magnetotérmica y diferencial, que protegen al resto de elementos del controlador. En la imagen también se pueden observar las fuentes de alimentación de 24V. Estas, por su conexionado, permanecerán encendidas siempre que el interruptor general esté cerrado. La fuente de alimentación de la izquierda se conecta al PLC en los terminales 24V y GND y sirve para alimentar el sistema del PLC. La fuente de la

derecha se conecta a los terminales COM+ y COM- del PLC y sirve para alimentar las salidas de este. Además, también se conecta al sistema de puesta en marcha/paro.

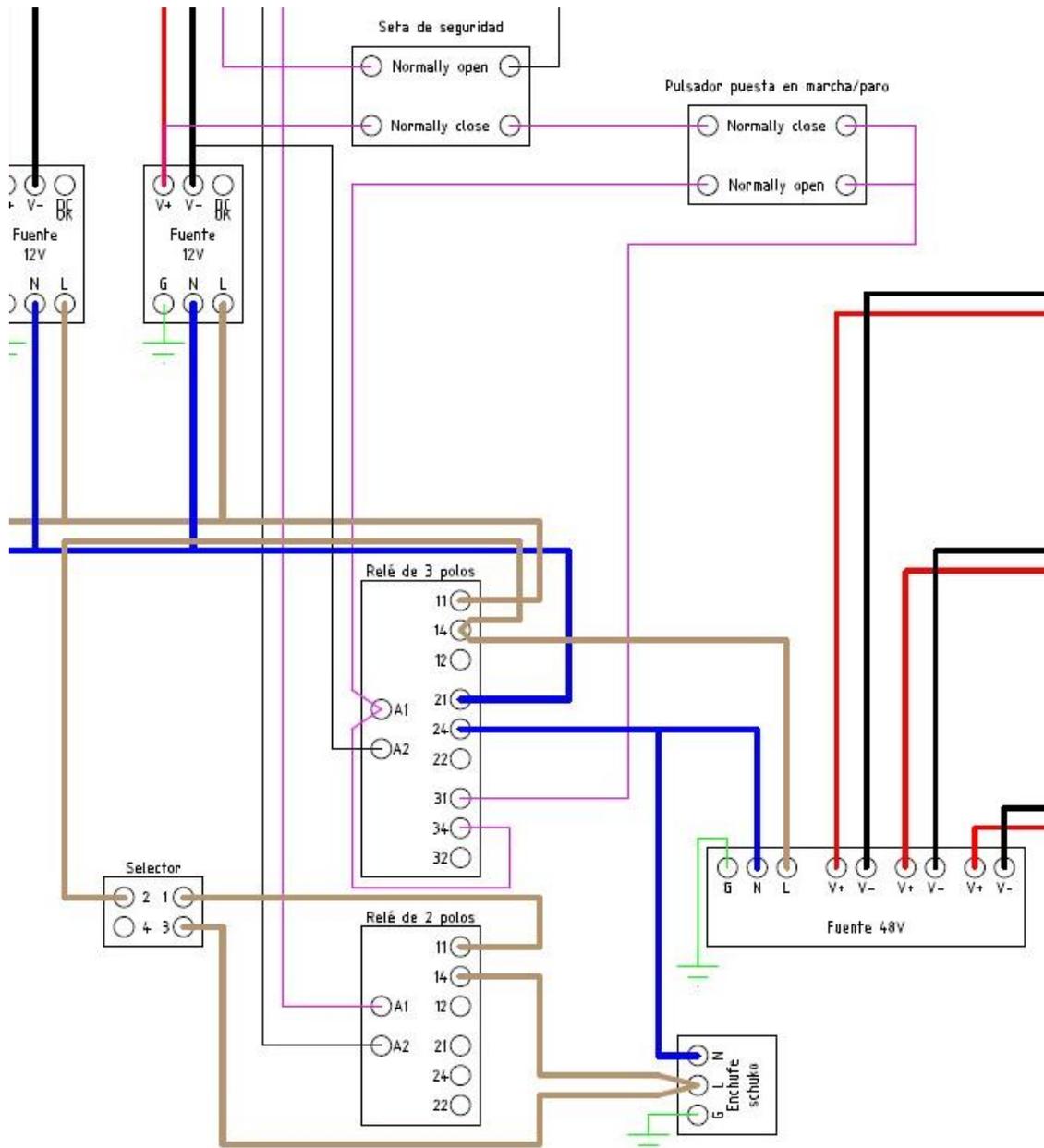


Figura 25: Fragmento del esquema con relés y puesta en marcha. (Elaboración propia)

La Figura 25 muestra el fragmento del esquema eléctrico que corresponde con el sistema de puesta en marcha y paro. En primer lugar, se encuentra la seta de seguridad que consta de un interruptor normalmente abierto (normally open, en adelante NO) y otro normalmente cerrado (normally close, en adelante NC). El NO sirve para enviar una señal al PLC. El cable dibujado en color magenta va al terminal ESTOP (emergency stop) del PLC, y el cable negro a un terminal COM. El interruptor NC se conecta al positivo de una fuente de alimentación de 24V y un extremo del pulsador NC de los botones de marcha/paro. El extremo opuesto del pulsador NC se conecta con un extremo del pulsador NO de los botones marcha/paro y con el terminal 31 del relé de 3 polos, que es el terminal común para el polo 3 (la nomenclatura de los terminales de los relés utilizados es la siguiente: El primer número indica el número del polo, 1, 2 o 3, el segundo número indica el tipo de conexión, el 1 es el borne común, el 2 es normalmente cerrado y el 4 es normalmente abierto. A1 es el polo positivo de la bobina y A2 el negativo). El extremo opuesto del pulsador NO de los botones marcha/paro se conecta al terminal A1 del relé de 3 polos.

Al relé de 3 polos se conecta corriente alterna 220V que sale del interruptor automático diferencial. La fase al terminal 11 y el neutro al terminal 21. El terminal 14 se conecta con el terminal L de la fuente de alimentación de 48V DC y con el terminal 2 o 4 del selector. El terminal 24 se conecta con el terminal N de la fuente de alimentación de 48V DC y con uno de los polos del enchufe schuko. Para terminar con las conexiones del relé de 3 polos falta conectar el terminal A2 al polo negativo de la fuente de alimentación de 24V.

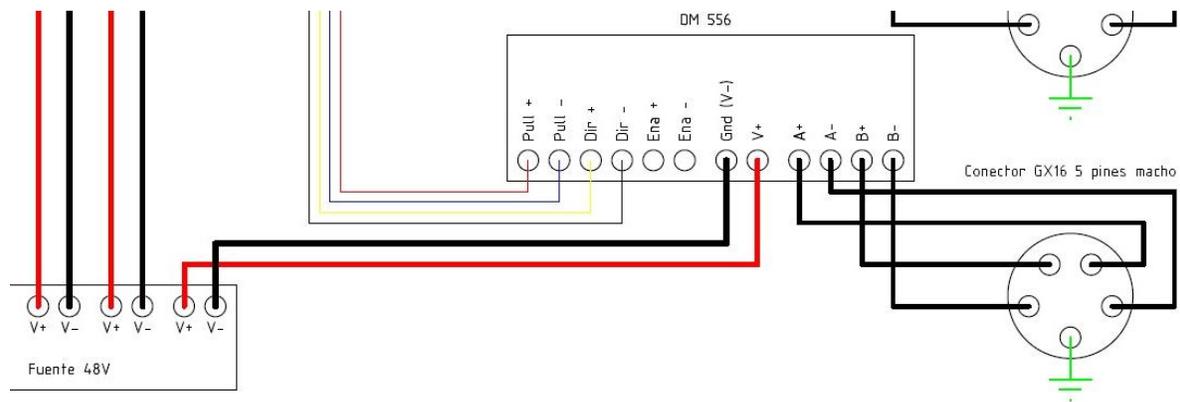
El terminal 1 del selector será para el modo automático y se debe conectar al terminal 11 del relé de 2 polos. El terminal 3 del selector es para el modo manual y se conecta al polo libre del enchufe schuko.

Las conexiones restantes del relé de 2 polos son: conectar el terminal 14 con el polo del enchufe schuko al que se haya conectado el terminal 3 del selector, conectar el terminal A1 con un terminal COM+ del PLC y conectar el terminal A2 con el terminal M3 del PLC.

Para terminar con la Figura 25 hay tres pares de cables negros y rojos que salen de la fuente de alimentación de 48V DC. Estos cables son los responsables de alimentar los drivers para los motores paso a paso.

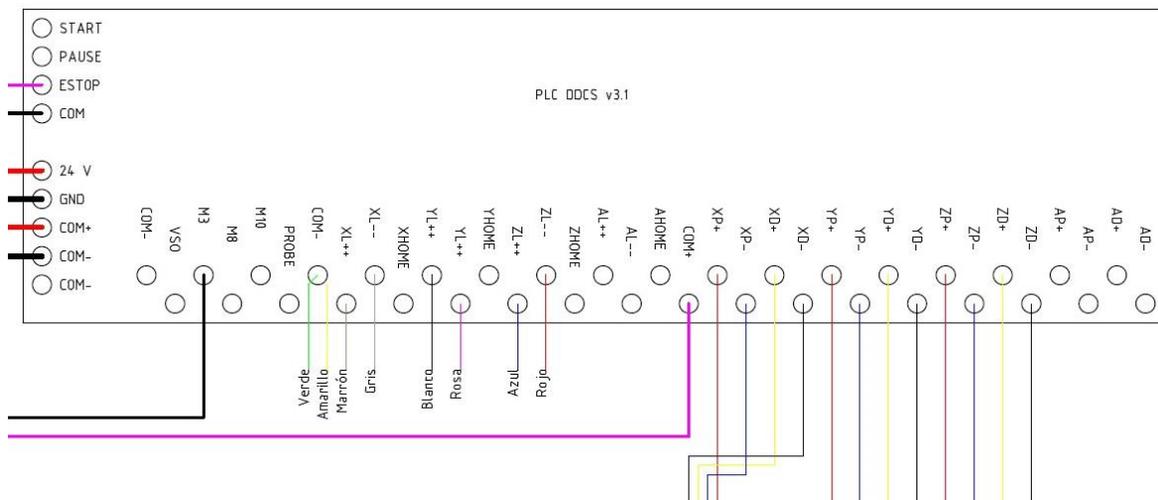
Con estas conexiones se consigue:

- Al energizar la bobina del relé de 3 polos, se permite alimentar los motores paso a paso y el motor fresador. Cuando la bobina no esté energizada el motor fresador dejará de funcionar y la posición de la maquina quedará fija.
- Al accionar la seta de seguridad, la bobina del relé de 3 polos deja de estar energizada y el PLC recibe la señal de que el sistema está en parada de emergencia.
- Al accionar el botón de paro la bobina del relé de 3 polos deja de estar energizada.
- La única forma de energizar la bobina del relé de 3 polos después de una parada es con el pulsador de marcha.



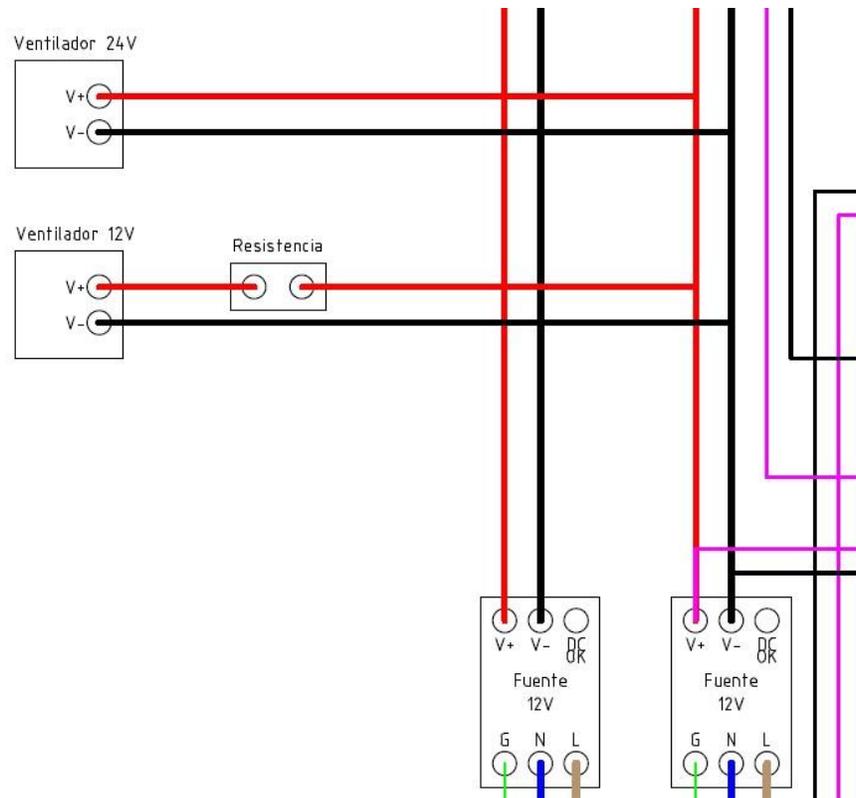
*Figura 26: Fragmento del esquema con drivers de los motores paso a paso. (Elaboración propia)*

La Figura 26 muestra la conexión de uno de los drivers de los motores paso a paso. Los terminales Gnd y V+ se conecta con los terminales V- y V+ de la fuente de alimentación de 48V respectivamente. Los terminales A+, A-, B+, B- se deben conectar mediante cable apantallado a los conectores GX16 de 5 pines como se muestra en la figura. Los terminales Pull+, Pull-, Dir+ y Dir- se conectan a los terminales P+, P-, D+, D- del eje correspondiente en el PLC.



*Figura 27: Fragmento del esquema de conexión del PLC. (Elaboración propia)*

En la Figura 27 se muestran las conexiones del PLC. Los terminales ESTOP y COM están conectados al interruptor normalmente abierto de la seta de seguridad. Los terminales 24V y GND están conectados respectivamente a V+ y V- de una de las fuentes de alimentación de 24V. Los terminales COM+ y COM- están conectados respectivamente a V+ y V- de la otra fuente de alimentación de 24V. M3 y COM+ están conectados respectivamente a los terminales A1 y A2 del relé de 2 polos. Los terminales COM-, XL++, XL--, YL++, YL--, ZL++ y ZL-- corresponden a los finales de carrera. Se conectan mediante una manguera a un conector DB9, y se ha considerado que su identificación es más sencilla por colores. Por último, XP+, XP-, XD+, XD-, YP+, YP-, etc. Se conectan a los terminales PUL+, PUL-, DIR+, DIR- de los drivers de los motores paso a paso. Cada eje utiliza un driver distinto.



*Figura 28: Fragmento del esquema con los ventiladores. (Elaboración propia)*

En la Figura 28 se muestra la conexión de los ventiladores. Los ventiladores seleccionados para este proyecto han sido reciclados de otras máquinas o proyectos. Uno de ellos es un ventilador de 12 V y 0,6 W. Para poder conectarlo a la alimentación de 24V se le debe soldar una resistencia en serie de valor 240  $\Omega$  y potencia nominal al menos 1,2 W. En la práctica la resistencia es algo mayor (270  $\Omega$ ) y de 2,5 W por la disponibilidad en el momento.

## **Capítulo 4. Fabricación e implementación del control.**

Este capítulo tratará sobre la elección de los componentes, el diseño y fabricación de algunos elementos y la instalación de cada elemento.

### **4.1 Gestión De Compras (Procurement).**

Procurement es un término en inglés que significa “obtención”. En el ámbito de un proyecto, es la parte encargada de conseguir los medios y materiales necesarios para llevarlo a cabo. En este proyecto los materiales se adquirieron mediante la compra a proveedores o el reciclaje. Se hablará más extensamente sobre ello en el capítulo 6 dedicado al análisis económico del proyecto. La adquisición de materiales se realizó en tres compras. Una primera compra con los materiales fundamentales necesarios para hacer funcionar la fresadora. En esta primera compra se incluyeron el PLC, los drivers de los motores paso a paso y las fuentes de alimentación, para poder elaborar un primer montaje a modo de prototipo para verificar el funcionamiento del sistema. En una segunda compra se compraron todos los materiales restantes: armario eléctrico, protecciones eléctricas, interruptores, relés, cables, etc. Finalmente se realizó una última compra con materiales que no se habían tenido en cuenta o que estaba pendiente decidir si se iban a reutilizar de alguna otra máquina.

### **4.2 Fabricación.**

En este apartado se hablará de los elementos que se fabricaron específicamente para este proyecto y de aquellos que fueron modificados para cumplir una función. Los procesos más utilizados han sido la fabricación aditiva, la soldadura blanda, el crimpado y el arranque de material.

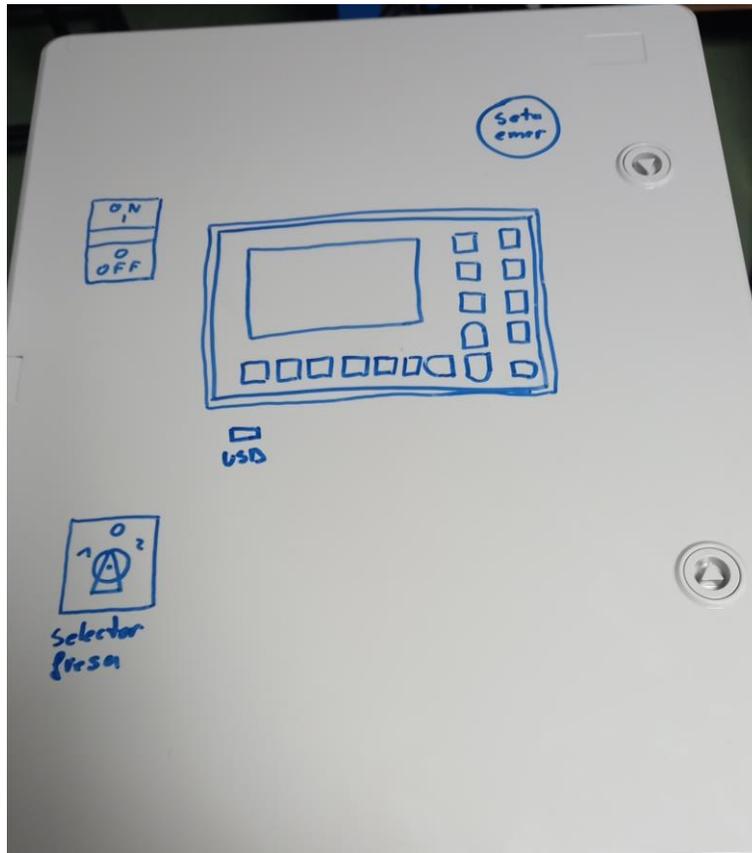
#### ***4.2.1 Armario eléctrico.***

Se adquirió a través a de Amazon un armario eléctrico de dimensiones 400x500x240 con placa de montaje galvanizada y fabricado en ABS. Las modificaciones realizadas a dicho armario constan del corte de orificios en su exterior para acomodar botones, pantalla, conectores y demás elementos situados sobre la superficie del armario, y perforación y roscado de agujeros en la placa galvanizada para posteriormente poder acomodar los elementos del control.



*Figura 29: Elementos montados sobre la placa galvanizada en el interior del armario eléctrico. (Elaboración propia)*

En la Figura 29 se observa el montaje sobre la placa galvanizada de los elementos del controlador. En la imagen falta por montar un relé que se retrasó en la entrega.



*Figura 30: Diseño del panel frontal del controlador. (Elaboración propia)*

En la Figura 30 se observa cómo se diseñó el aspecto del panel frontal del controlador utilizando un rotulador, para verificar la comodidad de la colocación de los elementos antes de comenzar a perforar el armario eléctrico.

#### **4.2.2 Fabricación aditiva.**

La fabricación aditiva es un proceso muy útil a la hora de hacer un retrofit, ya que permite la manufacturación de piezas a medida, que son de tirada única o muy reducida, en un corto espacio de tiempo. En este proyecto, se han fabricado las siguientes piezas, todas ellas en PLA utilizando tecnología de impresión 3d FDM:

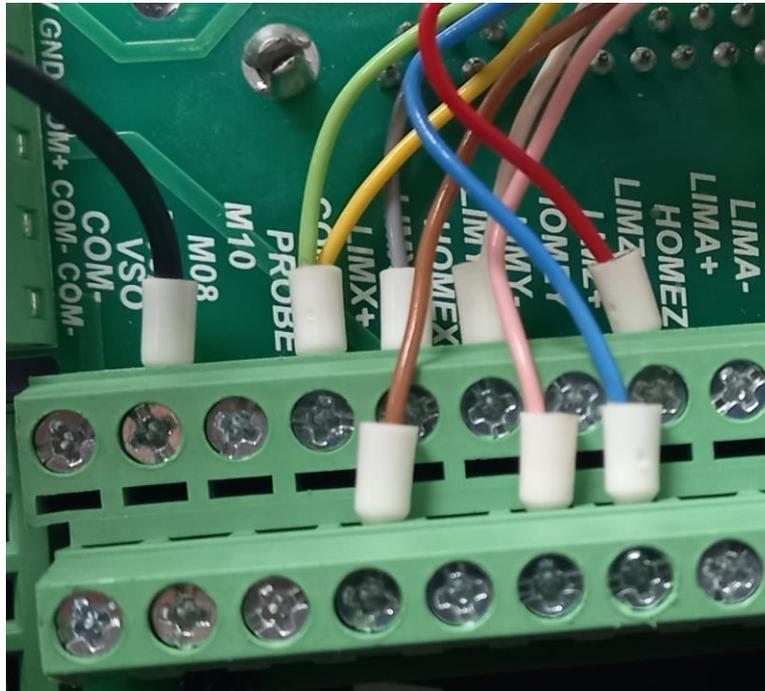
- Soporte para final de carrera X+
- Soporte para final de carrera X-
- Soporte para final de carrera Y+
- Soporte para final de carrera Y-
- Soporte para final de carrera Z+
- Soporte para final de carrera Z-
- Soporte para conector de los finales de carrera
- Embellecedor del conector de los finales de carrera
- Soporte del conector del MPG
- Embellecedor del conector del MPG
- Clip para cable plano



*Figura 31: Soporte para final de carrera Y-. Impreso en PLA azul e instalado en su posición final. (Elaboración propia)*

### **4.2.3 Soldadura y crimpado de cables.**

Todos los cables de la instalación han sido cortados a medida para que queden ordenados y sus extremos han sido crimpados o estañados para asegurar su conexión

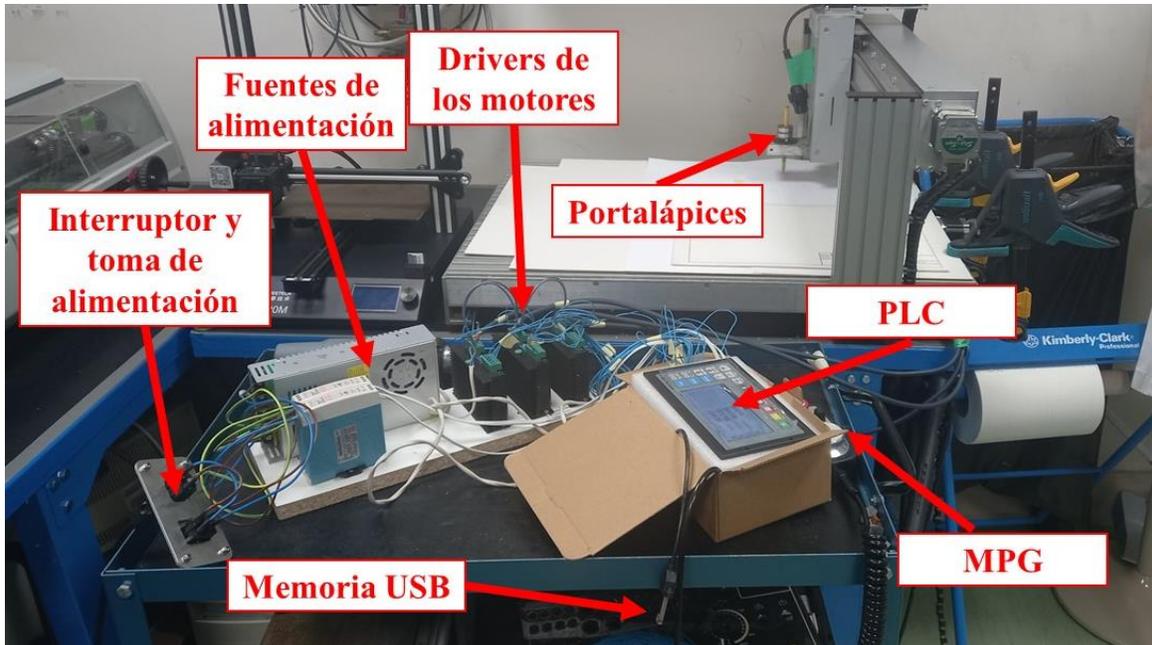


*Figura 32: Detalle de punteras crimpadas. (Elaboración propia)*

En la Figura 32 se pueden observar cables con punteras conectados en clemas del circuito impreso del PLC. Estos cables eran muy finos y las clemas no conseguían una conexión fiable, por lo que se crimparon unas punteras que facilitan la conexión.

### **4.3 Montaje del prototipo**

Tras la primera compra, había materiales suficientes como para montar un prototipo y verificar el funcionamiento de la máquina. De esta forma, utilizando materiales reciclados que había por el taller, como cables, un interruptor y una tabla, se monta el primer prototipo de la máquina.



*Figura 33: Montaje del prototipo del controlador. (Elaboración propia)*

En la Figura 33 se observa el montaje del prototipo. Para verificarlo se diseñó un sistema, en la imagen marcado como “Portalápices” que permitía colocar un lápiz en la brida donde normalmente se colocaría el motor fresador. Este elemento estaba diseñado para permitir subir y bajar al lápiz utilizando un peso; con el objetivo de que, al dibujar, el contacto del lápiz con el papel ejerciese la misma fuerza contra el papel independientemente del desgaste de la mina del lápiz. Con este elemento se pudieron ejecutar los primeros programas en la máquina para verificar su funcionamiento.

El portalápiz fue fabricado en PLA utilizando una impresora 3D. Se utilizó un rodamiento radial de rodillos a modo de peso. En la Figura 35 se muestra el dibujo de un patrón de calibración hecho en la fresadora CNC. El diseño del portalápices es simple y rápido, pero la holgura necesaria para permitir que el lápiz suba y baje produce imperfecciones de alineamiento al dibujar por lo que no permite calcular errores dimensionales o geométricos de forma precisa sobre los dibujos.

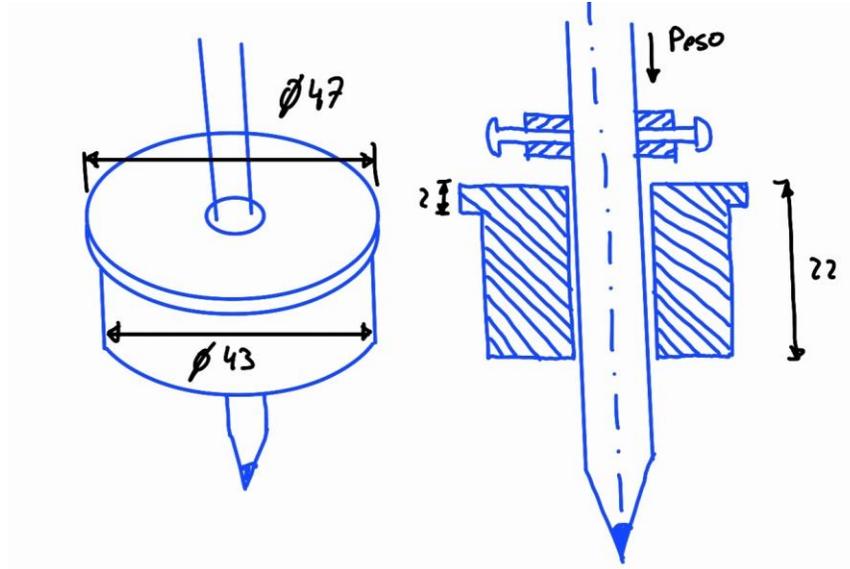


Figura 34: Croquis del elemento portalápices. (Elaboración propia)

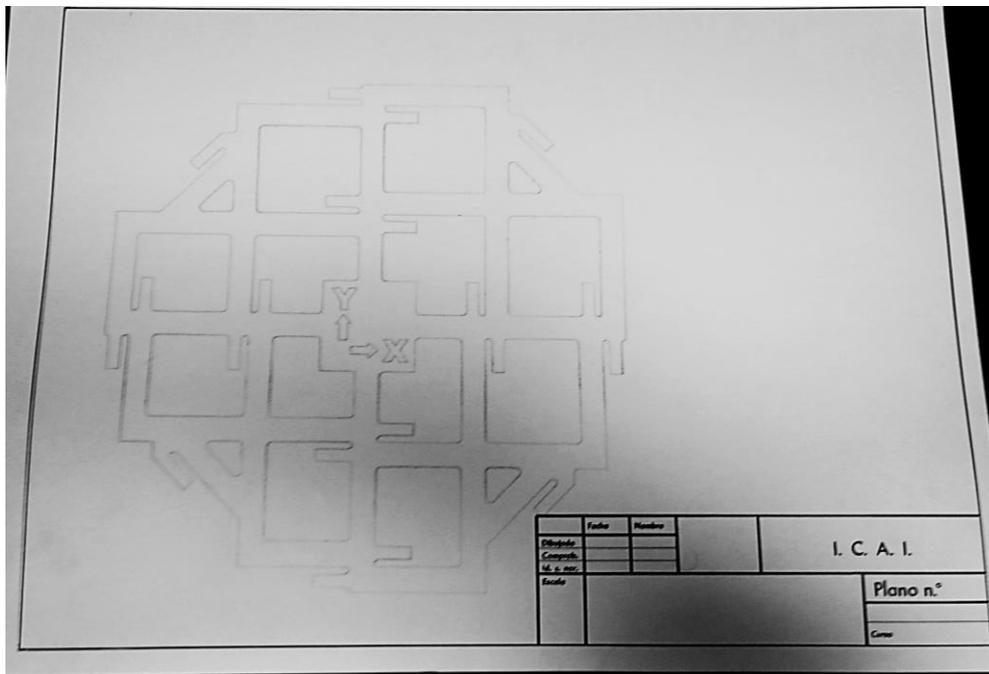


Figura 35: Dibujo realizado en la fresadora utilizando el portalápiz. (Elaboración propia)

#### **4.4 Modificaciones realizadas a la máquina fresadora.**

Una vez probado el prototipo, se decidieron implementar los siguientes cambios sobre la máquina.

##### ***4.4.1 Sustitución e instalación de nuevos finales de carrera.***

Se retiraron los finales de carrera que estaban montados en la máquina y se sustituyeron por otros con rodillo y de mejor calidad de la marca Omron, modelo D2F-01L2-D3. Esta sustitución se realizó con el fin de mejorar la repetibilidad de la operación “HOME”. Además, se instalaron nuevos finales de carrera para limitar el sentido positivo de los ejes. Otro cambio con respecto de la instalación anterior es que los finales de carrera se han conectado como normalmente cerrados, de modo que, si falla alguna conexión, será fácilmente detectable por el sistema.

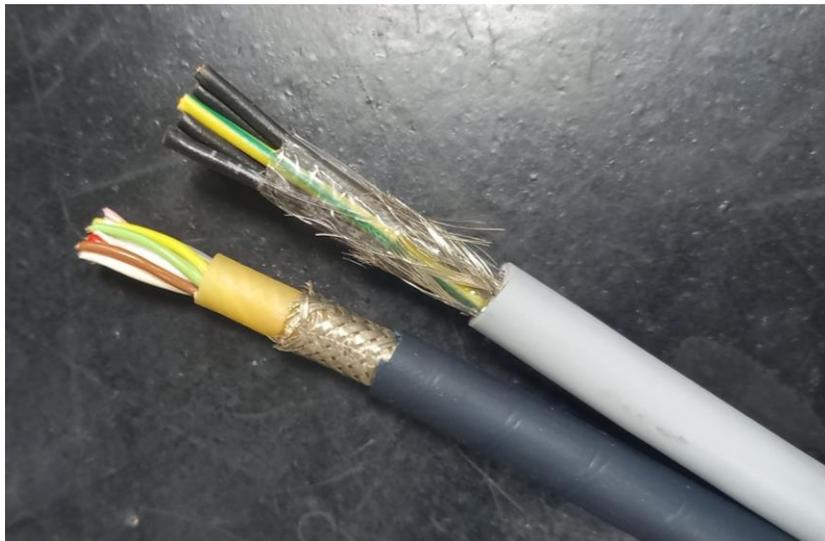
Añadir finales de carrera tiene un pequeño inconveniente, al ocupar un espacio que antes estaba libre, se reducen las dimensiones de trabajo de la máquina. En este caso, las dimensiones de trabajo originales 590mm x 480mm x 90mm han pasado a 570mm x 460mm x 70mm. En el futuro, quizá sea posible rediseñar los soportes de los finales de carrera para minimizar esta reducción de espacio.



*Figura 36: Final de carrera X--.* (Elaboración propia)

#### **4.4.2 Sustitución del cableado.**

Se retiraron las mangueras de cable apantallado de 8 núcleos de  $0,25\text{mm}^2$  y se instalaron mangueras de cable apantallado de 5 núcleos de  $0,5\text{mm}^2$  para los motores paso a paso y cables negros y rojos para los finales de carrera, que posteriormente se sueldan a una manguera de cable apantallado de 8 núcleos reciclada. La manguera de 5 núcleos que alimenta los motores paso a paso cuenta con un núcleo de color verde-amarillo que se utilizará como toma de tierra. El apantallamiento está conectado eléctricamente solo del lado del conector GX16 de 5 pines.



*Figura 37: Comparativa de los cables. (Elaboración propia)*

En la Figura 37 se muestra el cable que tenía la máquina instalado (manguera de color azul, en la parte inferior) y el cable por el que se ha sustituido (manguera de color gris, arriba). Las principales diferencias son: el número de conductores, 8 conductores frente a 5 y la sección de los conductores ( $0,25$  frente a  $0,5\text{ mm}^2$ ). Existe otras diferencias como la densidad del apantallamiento y la cantidad de aislamiento. La manguera nueva tiene menor aislamiento y apantallamiento, pero tiene mayor flexibilidad y permite giros con menor curvatura.

#### ***4.4.3 Sustitución de los conectores.***

Se sustituyen los conectores DB9 que anteriormente servían para conectar la alimentación del motor y la señal del final de carrera de cada eje por un conector GX16 de 5 pines macho para conectar la toma de tierra y la alimentación de cada motor, y un conector DB9 para el cable con las señales de todos los finales de carrera.



*Figura 38: Conectores utilizados. (Elaboración propia)*

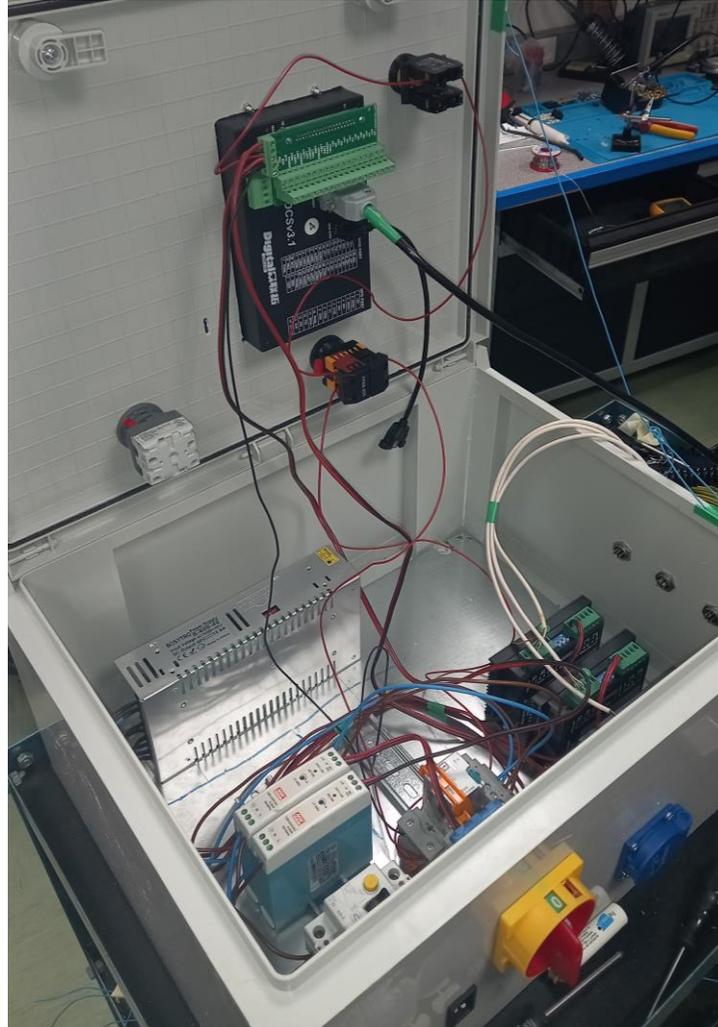
La Figura 38 muestra un cable con conector GX16 de 5 pines (arriba) utilizado para alimenta el motor paso a paso del eje Z, y un cable con un conector DB9 (abajo) que se usa para las señales de los finales de carrera. Además, este conector se ha reutilizado, de los que usaba la máquina para alimentar los motores.

#### **4.5 Montaje definitivo.**

Una vez adquiridos la mayoría de los materiales, verificado el funcionamiento del prototipo y diseñado el esquema eléctrico, se puede proceder al montaje definitivo. Para ello, con el armario eléctrico vacío, se comienzan a cortar los agujeros sobre la superficie del armario eléctrico para alojar el PLC, los conectores y los interruptores. En este paso hay que destacar que el ABS es un plástico con una temperatura de fusión baja (unos 200°C) por lo que es preferible el uso de herramientas manuales frente a herramientas eléctricas. Para realizar taladros se recomienda usar brocas específicas para plástico o en su defecto brocas para madera, y utilizar siempre la mínima velocidad de giro posible. También hay que destacar que el ABS es un material blando y que resulta sencillo utilizar limas para que los agujeros encajen a la perfección. Para un acabado estético, es importante ayudarse de una escuadra, para asegurar que los elementos quedan montados de forma paralela a los bordes del armario.

Una vez instalados todos los elementos que van montados sobre la superficie del armario, se procede a colocar la placa galvanizada con los elementos ya montados como se mostró anteriormente en la Figura 29. Hay que destacar que la placa no entra si se intenta introducir de forma paralela al fondo del armario, ya que chocará con el interruptor general, para ello se puede desmontar el interruptor o introducir la placa de forma diagonal y girarla una vez pasado el interruptor. Para montar y desmontar la placa es obligatorio desmontar los ventiladores.

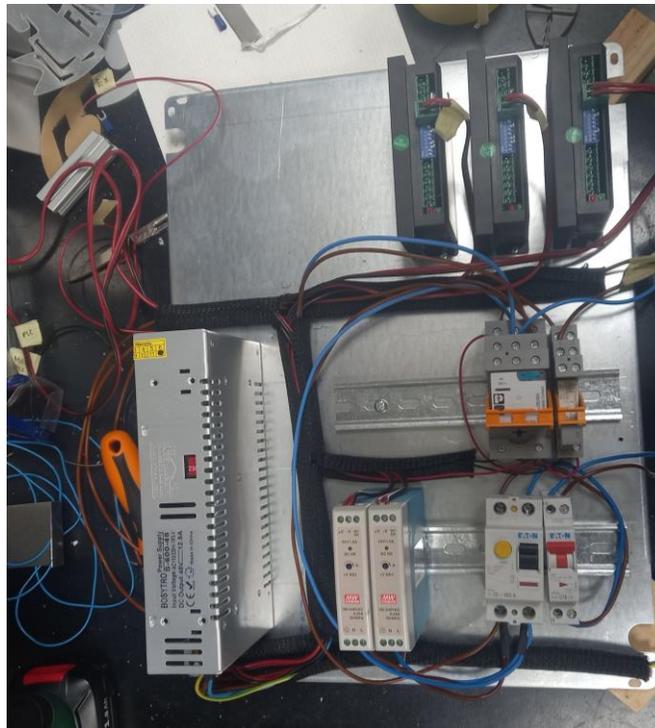
Con la placa en su sitio, se puede comenzar a cablear todos los elementos. Este cableado es provisional, para verificar el funcionamiento del control completo y hacerse una idea de por dónde han de ir los cables para que queden ordenados. Es por ello por lo que es recomendable cortar los cables algo más largos de lo que deberían ser. En este paso no se crimparán ni soldarán los cables. Durante este proceso es importante tener alguna forma de identificar los cables. En este proyecto en particular se utilizó cinta de carroceros y un rotulador.



*Figura 39: Imagen tomada durante el proceso de cableado de la máquina. (Elaboración propia)*

Una vez se han conectado todos los cables y se ha verificado que el controlador funciona correctamente y se han identificado los cables, hay que ordenar. Para ello se desmontaron todos los cables por el extremo en el que no estaban conectados a un elemento de la placa y se sacó la placa de la caja para trabajar con mayor comodidad. Ya con la placa fuera, se agrupan los cables, se traza cuál es su posición y se comienzan a ordenar. En este paso hay que cortar a medida los cables que se conectan de un elemento a otro de la placa. También

hay que crimpar o estañar los extremos de las conexiones con elementos de la placa. Para que quede visualmente mejor, se pueden ocultar los cables utilizando canales o conductos ranurados. En este proyecto se utilizaron tubos de un tejido polimérico y bridas que había por el taller para proteger y ocultar los cables. Además, el uso de tubos aporta mayor flexibilidad, y permite proteger y ocultar los cables que van de la placa de montaje al PLC situado en la puerta del armario eléctrico.

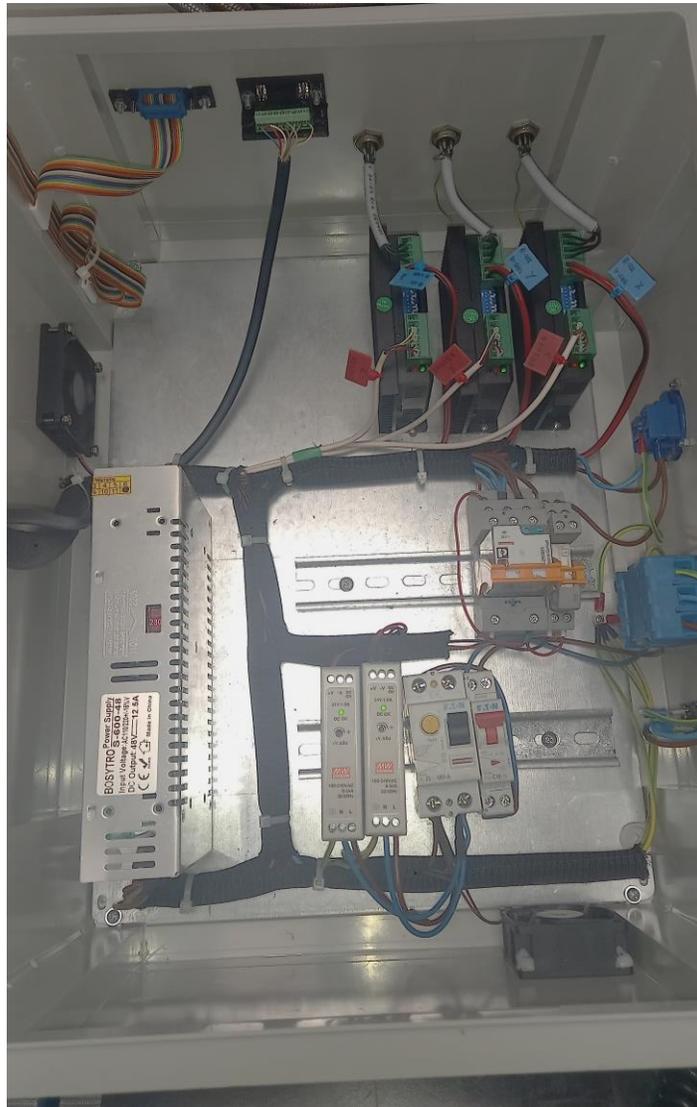


*Figura 40: Imagen tomada durante el proceso de ordenar los cables. (Elaboración propia)*

Una vez terminado este proceso queda la placa visiblemente ordenada y ramales de cables que deben conectar con los elementos montados en la superficie del armario. Así pues, se vuelve a introducir la placa en el armario, se cortan a medida los cables restantes y tras dar estaño a las puntas o crimparlos se conectan en su sitio. Posteriormente se tapan todos los cables con otro trozo de tubo y se aseguran con bridas. En este paso, se decidió mejorar la identificación de los cables utilizando etiquetas embridadas.

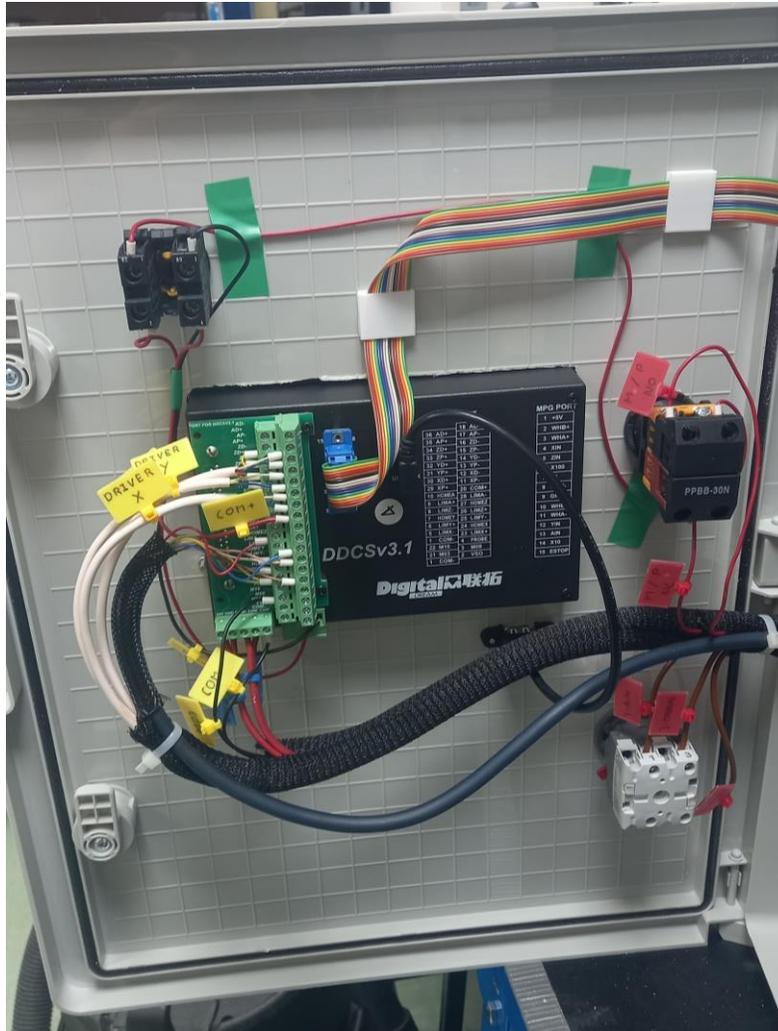
## 4.6 Aspecto final.

En este apartado se describirá la apariencia del controlador una vez terminado su montaje.



*Figura 41: Placa de montaje tras la instalación de todos sus elementos. (Elaboración propia)*

En la Figura 41 se observa la placa de montaje del controlador con todos los elementos ya montados y los cables montados e identificados con etiquetas.



*Figura 42: Conexión de la puerta del armario eléctrico. (Elaboración propia)*

En la Figura 42 se puede observar las conexiones realizadas en la puerta del armario eléctrico, sobre la que va montada el PLC y los mandos. También se pueden observar unos clips de plástico de color blanco que sujetan el cable plano multicolor. Estos clips se fabricaron en una impresora 3d.



*Figura 43: Panel frontal del controlador. (Elaboración propia)*

La Figura 43 muestra el panel frontal del controlador, con los mandos debidamente etiquetados, el puerto para una memoria USB y el PLC con su pantalla de 5 pulgadas. También se pueden ver los seguros que mantienen cerrada la puerta del armario eléctrico.



*Figura 44: Panel superior del controlador. (Elaboración propia)*

La Figura 44 Muestra el panel superior del controlador. En él se encuentran los conectores para los cables de los motores paso a paso, los finales de carrera y el generador de pulsos manual. Todos los conectores están debidamente identificados.



*Figura 45: Panel lateral derecho del controlador. (Elaboración propia)*

En la Figura 46 se puede observar el panel lateral derecho del controlador. En él se encuentra el interruptor general, el conector de alimentación monofásico y la toma de alimentación del motor fresador.



*Figura 46: Controlador con la puerta abierta. (Elaboración propia)*

En la Figura 46 se muestra el controlador apoyado sobre su panel inferior y con la puerta abierta. Esta imagen ofrece una visión general de todo el controlador. En esta imagen también se puede apreciar la necesidad de utilizar un elemento flexible para proteger y ocultar los cables ya que hay cables que pasan de la placa de montaje a un elemento móvil que es la puerta del armario eléctrico. En esta imagen también se pueden observar los ventiladores, que se encuentran en los paneles inferior y lateral izquierdo, de los que no se ha incluido fotografía al carecer de mayor importancia.



*Figura 47: Fresadora y controlador en su posición final. (Elaboración propia)*

Para terminar, en la Figura 47 se muestra la fresadora y el controlador en su disposición final. El controlador se ha situado con una cierta inclinación para mejorar la accesibilidad, ya que al estar inclinado resulta más cómodo que si se encontrase apoyado sobre la mesa.

## **Capítulo 5. Verificación del diseño.**

La verificación es una parte fundamental del proceso de instalación de cualquier máquina. El objetivo de la verificación es comprobar que la instalación se ha realizado correctamente y que las prestaciones de la máquina son óptimas. El proceso de verificación de esta máquina no ha sido muy riguroso. Había presión para ponerla en funcionamiento ya que se necesitaba mecanizar unas piezas para el concurso “SocialTech Challenge”, que consistía en el montaje de una silla de ruedas autónoma para visitar museos y cuyo ganador fue el equipo de la universidad de Comillas.

Ya con la máquina en funcionamiento se ha diseñado un pequeño ensayo para conocer las precisiones dimensionales de los ejes X e Y, así como el grado de perpendicularidad entre estos.

### **5.1 Diseño del ensayo.**

El ensayo consistirá en el mecanizado de la pieza descrita en la Figura 48 y cuyo plano está adjunto en el Anexo II. Plano de la pieza de verificación

. La pieza está diseñada con el propósito de ser medida tras su mecanizado y comparar las medidas con las longitudes reales del plano.

El objetivo de este diseño es medir la precisión con la que la máquina puede posicionarse a lo largo del eje X y del eje Y. Para ello, tras mecanizar la pieza se tomarán una serie de medidas interiores y exteriores.

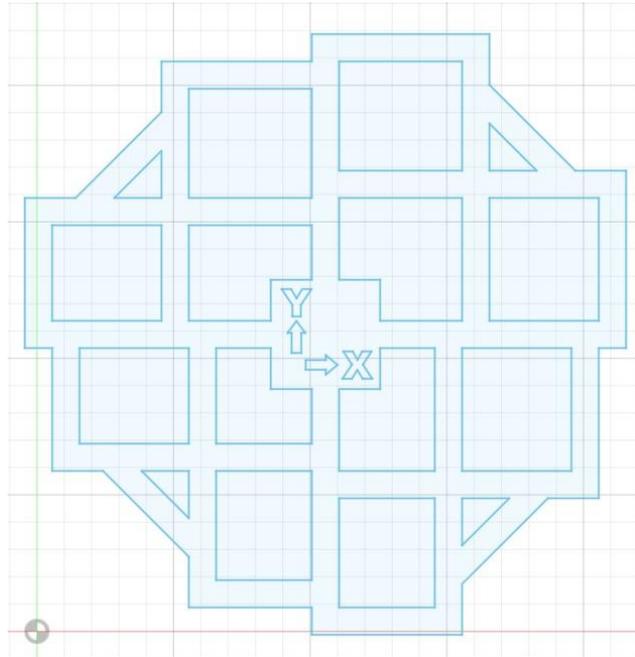


Figura 48: Diseño de la pieza del ensayo en Fusion 360. (Elaboración propia)

La idea original de este modelo proviene de un ensayo para calibrar impresoras 3d llamado “Califlower”, diseñado por Vector3D. La idea es un ensayo que permita medir la precisión del eje X, la precisión del eje Y, y la perpendicularidad entre estos ejes, tratando de aislar el máximo número de parámetros influyentes. Partiendo de esta idea, se ha adaptado el diseño para poder ser implementado en una fresadora.

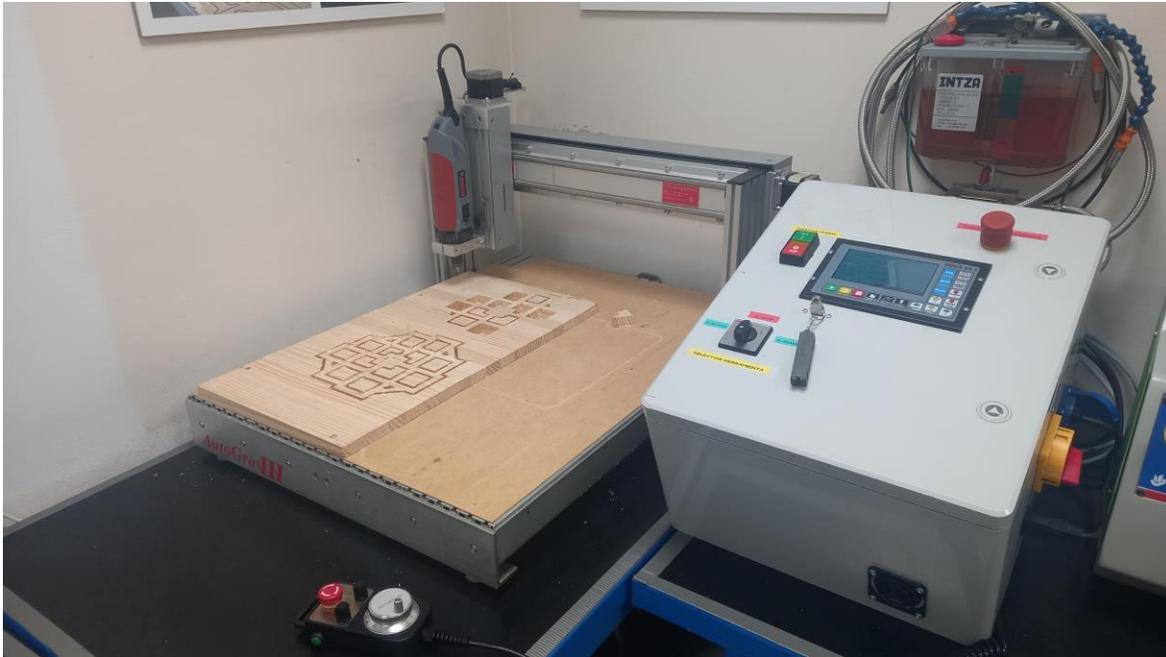
En primer lugar, se ha aumentado el tamaño. El error dimensional en un eje se produce mayoritariamente por un error al ajustar el número de pasos por unidad de distancia, haciendo que el error sea proporcional a la longitud. Por este motivo es mejor diseñar un modelo grande, ya que será más sencillo detectar y medir el error.

También se han eliminado geometrías complejas, que obligarían a realizar cambios de herramienta que podían afectar a la precisión de la máquina. La pieza se ha diseñado de manera que todas las superficies sobre las que se va a medir se puedan mecanizar con una misma herramienta.

Tomar medidas interiores y exteriores sirve para filtrar errores dimensionales que no se deban al sistema de posicionamiento. Para ilustrar este aspecto se pondrá de ejemplo que se quiere mecanizar la pieza con una herramienta de diámetro 5mm que se encuentra algo desgastada. Al realizar una pasada, arrancará menos material del que debe, por lo que una distancia de 100mm si se mide como distancia exterior puede medir 100,5mm mientras que si se mide como distancia interior medirá 99,5mm. Si solo se toma una de las medidas, la interior o la exterior, se estarían añadiendo 0,5mm de error que no son producidos por el sistema de posicionamiento, sino por la herramienta. Al tomar ambas medidas y hacer la media se elimina este tipo de error.

## **5.2 Realización del ensayo.**

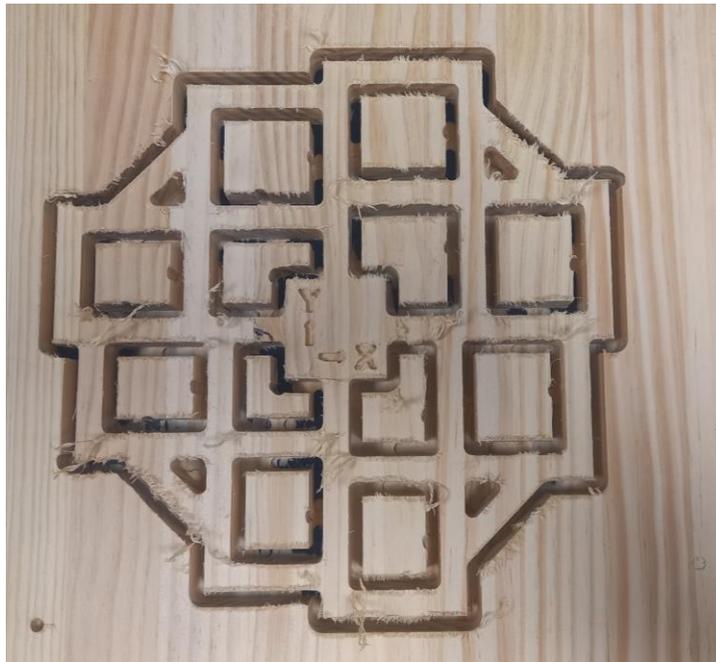
Para realizar el ensayo se han programado las trayectorias de la herramienta utilizando Fusion 360 con una tolerancia de 0,01mm. Se ha cortado la pieza sobre un tablero de madera de pino de 18mm de espesor utilizando una fresa de 5mm de diámetro y corte ascendente.



*Figura 49: Montaje para la realización del ensayo. (Elaboración propia)*

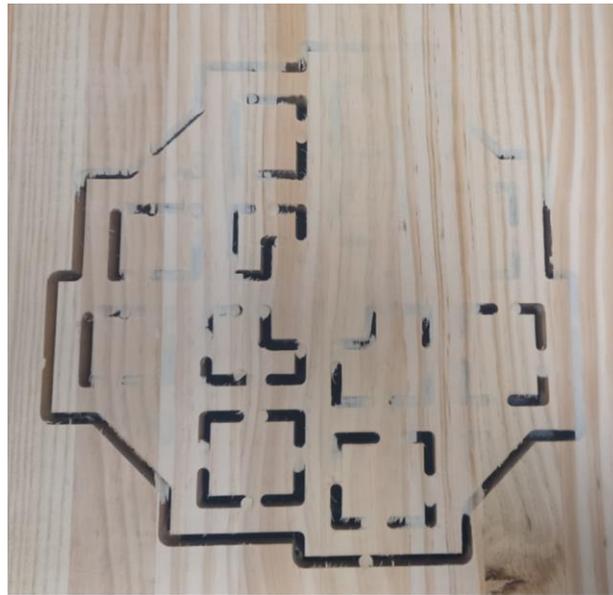
El ensayo se realizó dos veces. La primera vez, debido a un problema con el espesor de las pestañas (sobrantes de material que se dejan para que todos los elementos se mantengan unidos), uno de los recortes se levantó y quedó atascado entre el tablero y la herramienta, haciendo que los motores empezasen a perder pasos y arruinando el sistema de referencia de la máquina. El segundo ensayo se aumentó el espesor de las pestañas y se obtuvieron mejores resultados. Una vez terminadas las trayectorias de la herramienta que formaban las caras de la pieza, se cambió la fresa por otra de 2mm de diámetro para grabar las flechas del eje X y el eje Y, evitando así errores de identificación a la hora de medir.

En la Figura 50 se puede observar la parte superior del tablero en el que se cortó la pieza. La superficie contiene muchas rebabas. Esto se debe a que la fresa utilizada es de corte ascendente. Este tipo de fresa proporciona una buena evacuación de la viruta y un buen acabado en la parte inferior de la pieza, sin embargo, pueden producir desgarros y rebabas en la parte superior, especialmente en materiales fibrosos como la madera. En la esquina inferior izquierda se puede observar un pequeño taladro. Sirve para marcar el origen de los ejes X e Y en caso de que ocurra un problema durante el mecanizado.



*Figura 50: Parte superior del tablero en el que se cortó la pieza del ensayo. (Elaboración propia)*

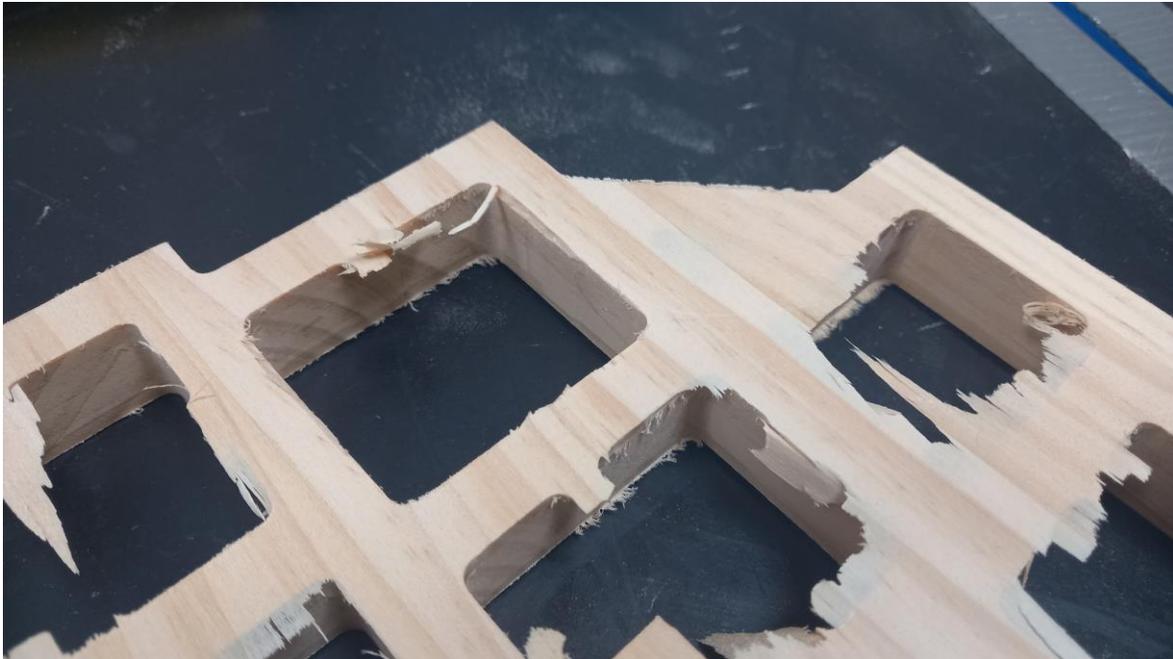
En la Figura 51 Se observa la parte inferior del tablero en el que se cortó la pieza. El acabado es mejor que el de la cara superior. No obstante, la herramienta no termino de cortar todo el material, dejando zonas con espesores muy finos. Esto se debe probablemente a que el tablero estaba algo curvado, y las sujeciones de la mesa no son muy buenas.



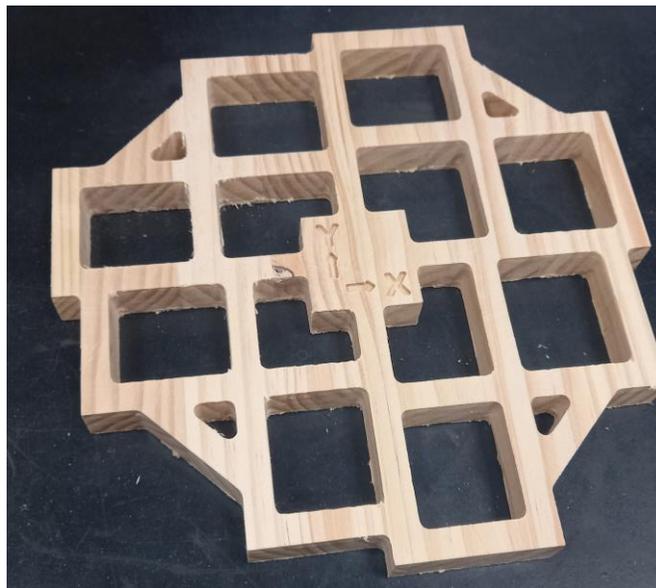
*Figura 51: Parte inferior del tablero en el que se cortó la pieza del ensayo. (Elaboración propia)*

La Figura 52 muestra un detalle de la pieza tras arrancarla del tablero y retirar los sobrantes. El acabado en la parte inferior apenas tiene rebabas en las zonas donde la herramienta ha profundizado por completo. También se puede apreciar que las zonas donde no ha terminado de cortar, el espesor es tan fino que deja la madera casi transparente.

Con ayuda de un cúter y papel de lija, en poco tiempo se pueden cortar las pestañas y eliminar sobrantes y rebabas, dejando la pieza como se muestra en la Figura 53 lista para realizar mediciones.



*Figura 52: Detalle de la parte inferior de la pieza antes de limpiarla. (Elaboración propia)*



*Figura 53: Pieza de verificación una vez limpiada. (Elaboración propia)*

### **5.3 Precisión teórica.**

La máxima precisión que puede conseguir esta máquina se calcula teniendo en cuenta únicamente cuál es la mínima distancia que pueden mover sus ejes. Los datos necesarios son el paso de los motores y el paso de los husillos. Para los ejes X e Y los husillos son trapezoidales y tienen un paso de 4mm, es decir, en un giro completo, el husillo avanza 4mm. Los motores paso a paso instalados son motores de 200 pasos por revolución, es decir, que para dar una vuelta completa necesitan dar 200 pasos, o lo que es lo mismo, que cada paso corresponde a un giro de 1,8 grados. La distancia mínima que se puede mover un eje es la distancia que corresponde al paso de un motor, por lo que se obtiene:

$$\frac{4mm}{1 rev} * \frac{1 rev}{200 pasos} = \frac{0.02mm}{paso}$$

En el eje Z, al tener un husillo con la mitad de paso (2mm), la precisión se duplica, siendo de 0.01mm/paso.

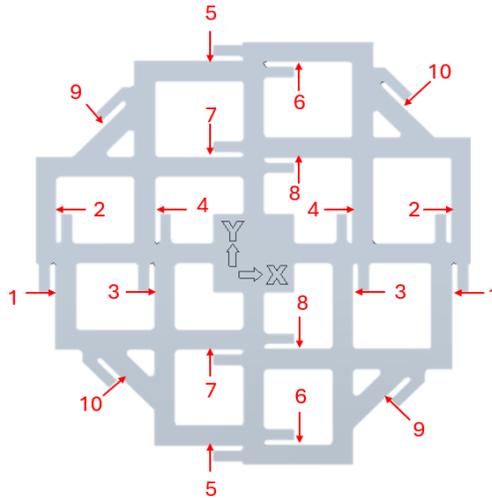
De cualquier modo, esto es solo una precisión teórica, la máxima precisión que se podría alcanzar con este sistema. En la realidad, hay muchos factores que afectan a la precisión de la máquina: la tolerancia del ángulo de giro de los motores paso a paso, la rigidez, las vibraciones, la pérdida de pasos en los motores, el agarre de la herramienta, etc.

#### **5.4 Medidas realizadas.**

Para realizar las medidas se utilizó un calibre de la marca ETALON mostrado en la Figura 54 con capacidad 500mm y resolución 0.02mm (Laboratorio de metrología CALIBRE PIE DE REY. Cód:10.30.10.17, rango 0-500 mm, resolución 20  $\mu\text{m}$ ). Cada medida se realizó 3 veces para reducir el error en la medida. Los resultados obtenidos se anotaron en un Excel que se preparó a propósito del ensayo. En él hay una imagen representada en la Figura 55 que indica claramente que medidas se debían tomar, así como su número para introducir los valores en una tabla. El modelo representado en la Figura 55, es ligeramente distinto del modelo utilizado en el ensayo, puesto que contiene unos apoyos diseñados para posicionar el calibre sobre ellos y asegurar que las medidas se realizan de forma completamente perpendicular a la superficie. Se eliminaron para simplificar el diseño. Al no estar, resulta un poco más complicado tomar medidas de forma precisa.



*Figura 54: Calibre utilizado. (Elaboración propia)*



*Figura 55: Esquema que indica los números de las medidas en el Excel. (Elaboración propia)*

Medida Nº.	Dimensión esperada	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media 1	Media 2
1	200	200,40	200,02	200,22	200,213	200,03
2	200	199,92	199,74	199,86	199,840	
3	100	100,20	100,18	100,20	100,193	100,08
4	100	100,00	99,94	99,98	99,973	
5	200	200,12	200,20	200,20	200,173	200,00
6	200	199,82	199,84	199,82	199,827	
7	100	100,40	100,20	100,18	100,260	100,11
8	100	99,98	99,96	99,92	99,953	
9	200	199,90	199,94	199,96	199,933	
10	200	200,12	200,14	200,20	200,153	

*Tabla 1: Medidas del ensayo. (Elaboración propia)*

La Tabla 1 muestra las medidas realizadas en el ensayo (Medida 1, Medida 2 y Medida 3), la longitud esperada (Dimensión de diseño) y la media de las medidas (Media 1 y Media 2). La

media 1 se refiere a la media de las mediciones interiores o exteriores, mientras que la media 2 es la media de las medidas interiores y exteriores.

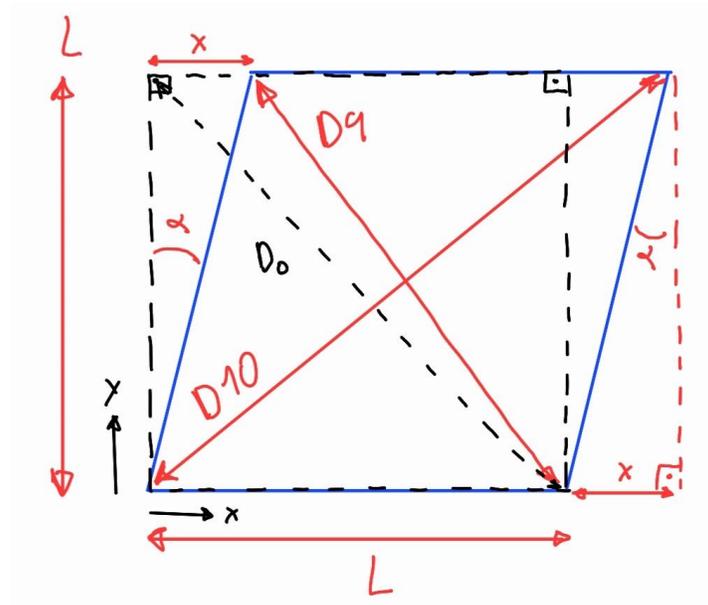
Del análisis de las medidas se puede destacar lo siguiente:

- **Desgaste de la herramienta:** Las medidas exteriores son siempre mayores que las medidas interiores. De esto se deduce que existe cierto desgaste en la herramienta. A pesar de ello, debido al diseño de la prueba, este desgaste no afecta al error.
- **Posible error en las medidas:** Existen diferencias de casi 0,4mm entre medidas de una misma longitud. Esta diferencia es demasiado elevada teniendo en cuenta que se está utilizando un calibre de precisión 0,02mm. Este error puede deberse a que las medidas no se han realizado de forma completamente perpendicular o a defectos en las superficies que no se eliminaron correctamente.

### **5.5 Cálculo del error de perpendicularidad.**

El error en perpendicularidad, también conocido como “skew” o “squareness error” en inglés, es el error cometido al no tener los ejes situados de manera completamente perpendicular. Es un tipo de error geométrico. Hace que las piezas queden distorsionadas, haciendo paralelepípedos en lugar de rectángulos. Cuanto más grande sea la pieza, mayor será el error cometido. Cuando el error es pequeño, puede corregirse mediante el uso de software. Para errores grandes es aconsejable ajustar la máquina.

Para calcular el ángulo de desviación con respecto a la perpendicular, en la pieza del ensayo se han diseñado dos medidas diagonales. Si los ejes están perfectamente alineados, ambas diagonales medirán lo mismo. En caso contrario, se tendrá información para calcular el ángulo de desviación y tomar las medidas oportunas.



*Figura 56: Croquis para ilustrar los cálculos del ángulo de desviación. (Elaboración propia)*

En la Figura 56 se puede observar en que consiste el error de perpendicularidad. En trazos negros discontinuos se muestra el cuadrado que trazaría una máquina sin error de perpendicularidad, con esquinas a 90 grados. En trazo azul continuo, se muestra el paralelepípedo que trazaría una máquina con error de perpendicularidad. En rojo se muestran los datos e incógnitas a despejar:

- $\alpha$  es el ángulo de desviación respecto de la perpendicular.
- $D_0$  es el diámetro de diseño, lo que debería medir. Es una magnitud conocida.
- $L$  es la longitud de los lados del cuadrado. Con el fin de simplificar los cálculos, se ha supuesto  $\alpha \approx 0$  por lo que la altura del paralelepípedo queda  $L * \cos(\alpha) \approx L$ .
- $D_9$  y  $D_{10}$  son las medidas obtenidas del ensayo que corresponden con la posición 9 y 10 respectivamente.
- $x$  es una variable introducida para facilitar los cálculos.

Con todo esto quedan las siguientes ecuaciones:

$$D_0 = L\sqrt{2} \rightarrow D_0^2 = 2L^2$$

$$tg(\alpha) = \frac{x}{L} \rightarrow x = L * tg(\alpha)$$

$$D_{10}^2 = L^2 + (L + x)^2$$

$$D_9^2 = L^2 + (L - x)^2$$

$$D_{10}^2 - D_9^2 = 4Lx = L * tg(\alpha) * 4L$$

$$tg(\alpha) = \frac{D_{10}^2 - D_9^2}{4L^2}$$

$$\alpha = arctg\left(\frac{D_{10}^2 - D_9^2}{2D_0^2}\right)$$

## 5.6 Resultados del ensayo.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos del ensayo.

	Media 1		Media 2	
	Error [mm]	Error [%]	Error [mm]	Error [%]
Eje X	0,213	0,107%	0,027	0,01%
	-0,160	0,080%		
	0,193	0,193%	0,083	0,08%
	-0,027	0,027%		
Eje Y	0,173	0,087%	0,000	0,00%
	-0,173	0,087%		
	0,260	0,260%	0,107	0,11%
	-0,047	0,047%		

Tabla 2: Resultados del error de posicionamiento en los ejes X e Y. (Elaboración propia)

En la Tabla 2 se muestran los errores medidos respecto de las longitudes de diseño. La media 1 corresponde a la media de 3 medidas de una misma longitud, que puede ser interior o exterior. La media 2 es la media de 6 medidas de una misma longitud, en la que 3 de estas medidas son exteriores y las otras 3 interiores. Se puede observar que los errores de la media 1 son generalmente mayores y dispares. El hecho de que sean positivos y negativos indica que existe desgaste en la herramienta. Este problema se soluciona al hacer la media 2. Este ensayo determina una precisión de 0,1mm para trabajos en los ejes X e Y.

En cuanto al ángulo de desviación respecto de la perpendicular, se ha calculado que es de 0,063°. Un valor tan cercano a 0 indica que la perpendicularidad de los ejes es casi perfecta. El hecho de que sea un valor tan pequeño también valida la hipótesis enunciada en los cálculos, en los que se ha supuesto  $\alpha \approx 0$ . Este error de perpendicularidad se puede corregir mediante el uso de software. Se valorará qué medidas emplear puesto que supone un error máximo de aproximadamente 0,6mm de desviación para la posición y respecto de X cuando se trabaja en la zona más alejada del origen.

## Capítulo 6. Viabilidad económica.

En este capítulo se tratará la viabilidad económica de este proyecto, así como el presupuesto y el coste de las alternativas.

### 6.1 Presupuesto.

A continuación, se incluye una tabla con el precio de todos los elementos que se compraron para este proyecto.

Componente	Proveedor	Cantidad (Uds.)	Precio de compra (€)
DDCS v3.1 4 ejes	Aliexpress.com	1	294,40
Stepper driver DM 556	Amazon .es	3	47,07
Fuente de alimentación 48V 600w	Amazon.es	1	35,29
Fuente de alimentación 24V 1A	Amazon.es	2	32,70
Relé de 3 polos	RS-online.com	1	19,66
Relé de 2 polos	RS-online.com	1	11,57
Cable apantallado 5 núcleos (50m)	RS-online.com	1	157,28
Finales de carrera (pack de 2)	RS-online.com	3	6,42
Botón de marcha y paro	Amazon.es	1	5,37
Interruptor automático magnetotérmico	RS-online.com	1	11,94
Interruptor automático diferencial	RS-online.com	1	38,42
Interruptor general de seguridad	Amazon.es	1	16,39
Armario eléctrico	Amazon.es	1	59,92
Enchufe schuko empotrable	Amazon.es	1	6,26

Conector GX16 5 pines (pack de 6)	Amazon.es	1	7,85
Conector DB9 con clemas	Amazon.es	1	6,61
Cable plano con conectores DB15	Amazon.es	1	9,99
		Total	767,14

*Tabla 3: Desglose del coste de materiales. (Elaboración propia)*

En la Tabla 3 se muestran los componentes adquiridos, el proveedor y el precio de adquisición. Los precios mostrados son precios totales, no unitarios. El IVA se encuentra incluido en el precio de la compra. Al comienzo del proyecto se estimó el presupuesto de este en unos 550-600€. El aumento del precio total se debe principalmente a que en un principio no se había pensado incluir protecciones eléctricas en el interior del armario eléctrico y tampoco se había planificado tener que cambiar las mangueras de alimentación de los motores paso a paso. Sobre el cable apantallado también hay que destacar que, al tratarse de un material tan específico, fue complicado encontrar un proveedor. Además, tuvo que comprarse una longitud de 50m cuando en el proyecto se han utilizado menos de 10m.

En el presupuesto no se han incluido materiales que ya estaban disponibles en el taller como algunos cables y terminales. Tampoco se han incluido elementos reutilizados de otras máquinas o proyectos como cables o ventiladores.

## **6.2 Alternativas al retrofit.**

En esta sección se discutirá cuáles eran las alternativas frente a la realización de un retrofit en la máquina. Las opciones eran:

- No hacer nada, manteniendo la máquina fuera de funcionamiento.
- Desechar la máquina y no adquirir un reemplazo.
- Sustituir la máquina por una nueva.

### ***6.2.1 Mantener la máquina fuera de servicio.***

No tomar medidas y mantener la máquina fuera de servicio es una opción que presenta algunas ventajas. En primer lugar, no supone ningún coste económico ni inversión. En segundo lugar, no se arriesga nada. Con esto se quiere decir que para intentar una reparación es necesario realizar una inversión, y el resultado de la reparación puede no cumplir las expectativas. Por último, al mantener la máquina fuera de servicio, queda ahí, y puede ser utilizada en el futuro, bien para ser reparada, o bien para canibalizar componentes.

Si embargo esta opción presenta un gran inconveniente. La máquina ocupa un espacio que podría ser utilizado bien como espacio de trabajo o bien para instalar otra máquina. Es por esto por lo que se decidió tomar medidas. O se ponía la máquina en funcionamiento o se retiraba de su lugar.

### ***6.2.2 Desechar la máquina.***

Desechar la máquina era otra posibilidad. Al deshacerse de la máquina se liberaría espacio en el taller y se facilitarían las labores de limpieza de este. Sin embargo, al deshacerse de la máquina se perdería el posible valor residual de esta y se descartaría cualquier posibilidad de reparar o reutilizar elementos. Además, se pierde la posibilidad de tener la capacidad productiva que ofrece la máquina.

### ***6.2.3 Sustituir la máquina por una nueva.***

Sustituir la máquina por una nueva es una solución rápida que permite deshacerse de la máquina que no funciona y disponer de una máquina capaz de realizar contornos complejos en tres dimensiones.

No obstante, requiere de una inversión importante. Una rápida búsqueda en Amazon.com muestra que los precios de una fresadora de características similares actualmente rondan los 1700-2000 €

## **Capítulo 7. Trabajos futuros.**

Durante la elaboración de este proyecto bien por falta de tiempo o bien por limitar la extensión del proyecto, hay tareas que han quedado pendientes de realizar. También se han pensado mejoras y nuevas funciones que podrían implementarse en el futuro, aprovechando la capacidad del nuevo controlador para ser modificado y ampliado.

### **7.1 Elaboración de la documentación de la máquina.**

Una de las posibles causas de obsolescencia del controlador de la fresadora es que no había ningún tipo de documentación de este. La documentación de una máquina debe estar siempre localizable y debe contener la información del sistema, así como las instrucciones para su puesta en funcionamiento, operación y mantenimiento.

Además, la creación de documentación de la máquina es un requisito necesario para regularizar la situación de esta.

### **7.2 Ensayo de repetibilidad de la operación home.**

Una de las funciones más importantes a la hora de tener precisión en la máquina es la operación home. Permite a la máquina tener un sistema de referencia fijo. La repetibilidad consiste en minimizar el error que comete la máquina al colocarse en esta posición.

Generalmente se mide con relojes comparadores.

### **7.3 Ensayo de perpendicularidad y precisión en el eje Z.**

Al igual que se hizo con el eje X y el eje Y, se debe verificar la precisión y la perpendicularidad del eje Z.

#### **7.4 Mejora del sistema de sujeción.**

La máquina cuenta con un sistema de ranuras en T para sujetar las piezas a mecanizar. No obstante, el sistema se vuelve inservible cuando se desea cortar material, ya que hay que colocar una tabla de sacrificio para evitar dañar los perfiles de aluminio, haciendo que las ranuras en T queden inaccesibles.

La idea es realizar una mesa que ofrezca diferentes formas de sujeción (ranuras en T, agujeros roscados y agujeros para perros). La mesa se realizará en un material blando como la madera, de manera que también sirva como tabla de sacrificio.

#### **7.5 Extractor de polvo.**

Es un sistema que se coloca alrededor de la herramienta de corte que permite capturar el polvo y las virutas generadas. Se debe conectar a un elemento de aspiración. No solo ayuda a mantener limpio el espacio de trabajo, sino que contribuye a prolongar la vida útil de las herramientas ya que, al extraer las virutas, evita que vuelvan a ser cortadas por la herramienta por ejemplo al realizar una operación de cajeadado.

#### **7.6 Sonda para la longitud de herramienta.**

La instalación de una sonda para medir la longitud de la herramienta facilitaría el colocar el origen del eje Z sobre las superficies a mecanizar.

#### **7.8 Mejora de los cobertores de los ventiladores.**

Actualmente los ventiladores están cubiertos por unas rejillas que evitan el paso de objetos de gran tamaño que pudieran dañar el ventilador. Se podrían instalar unos cobertores que permitieran incluir un filtro para polvo, reduciendo así la suciedad acumulada en el interior del controlador y el posible riesgo de incendio.

### **7.9 Variador de velocidad del motor fresador.**

Al poder controlar con precisión la velocidad de giro del motor fresador, se amplía el rango de materiales y herramientas que se pueden usar. Utilizar herramientas a velocidades de giro distintas a la de diseño reduce su vida útil y puede producir defectos en las piezas.

### **7.10 Cerramiento de la máquina fresadora.**

Construir una estructura para aislar la maquina fresadora supone múltiples beneficios. En primer lugar, es un elemento de seguridad, para evitar accidentes cuando la máquina está en movimiento. En segundo lugar, contribuye a reducir el ruido generado por la máquina, factor muy importante ya que se encuentra situada en una zona de aulas y despachos. Por último, el cerramiento contribuiría a mantener la suciedad controlada en el sitio y evitar que el polvo se disperse por todo el despacho.

### **7.11 Instalación de láser para corte y grabado.**

Adecuación de la máquina para tener la posibilidad de montar sobre ella un pequeño láser que permita cortar materiales de poco espesor, así como el grabado de estos. Esta ampliación, supondría aumentar la versatilidad de la máquina

### **7.12 Ampliación del número de puertos USB.**

Se buscará la manera de añadir al menos un puerto USB más, para poder conectar un teclado al controlador y poder explotar sus funcionalidades al máximo.

### **7.13 Ampliación del 4º eje.**

Ampliar las capacidades de la fresadora añadiendo un 4º eje rotativo sobre la mesa, ya que el controlador así lo permite.

## **Capítulo 8. Conclusiones.**

En este capítulo se discutirán las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto. En primer lugar, es fundamental que la documentación de una máquina se encuentre localizable y a ser posible, existan copias en formato tanto físico como digital. La existencia de documentación sobre las características de la máquina y el controlador, así como un manual de usuario, habrían facilitado las labores de análisis de elementos, y puede que hubieran evitado en primer lugar que el controlador se desmontara y dejara inutilizable. Por este motivo, la elaboración de un manual que recopile toda la información de los componentes del control, así como instrucciones para su operación, será una tarea prioritaria.

En segundo lugar, como se menciona en (24), “El retrofit de una máquina no solo mejora su rendimiento, sino que también aumenta su vida útil y reduce el impacto ambiental”. En este caso ha permitido poner en marcha una máquina de 17 años de antigüedad y adaptarla a las necesidades actuales, evitando que se tenga que comprar una nueva.

En tercer lugar, hay que destacar la calidad de fabricación de la parte mecánica de la máquina. El ensayo de verificación tenía como objetivo conocer cómo de deteriorada se encontraba la máquina, para posteriormente poder realizar los ajustes y reparaciones necesarios. Los resultados obtenidos del ensayo fueron sorprendentes si se tiene en cuenta que la máquina había pasado unos diez años sin mantenimiento. Del ensayo de verificación se obtuvo que la máquina tiene una resolución en los ejes X e Y de 0,1mm y un error en la perpendicularidad entre estos de 0,063°.

Del ensayo de verificación también se pueden obtener la conclusión de que el ensayo es mejorable y es posible que la máquina sea capaz de obtener una resolución aún mayor que la estimada en el ensayo, ya que de los 4 errores calculados hay 2 que son mucho más pequeños de 0,1mm.

Desde el punto de vista económico, se puede considerar que la decisión de elaborar un retrofit fue una decisión acertada. Habitualmente en el ámbito de la industria, se considera que pasados 15 años una máquina está completamente amortizada y su valor residual es nulo, por lo que no se debería invertir en mantener o actualizar la máquina. La máquina no tiene una aplicación industrial, sino que se emplea para investigación, experimentación y docencia. Se consideró que la realización de un retrofit sobre el controlador de la máquina sería adecuada, ya que, en el ámbito de la mecánica, no ha habido avances significativos en este tipo de máquinas y los componentes que tenía eran de buena calidad y estaban en perfectas condiciones.

Finalmente, se concluye que los resultados del proyecto son satisfactorios. La máquina se encuentra operativa y con unas precisiones mejores de las que se esperaban al comienzo del proyecto. Además, existe la posibilidad de ampliar el controlador y la máquina para implementar nuevas funcionalidades que faciliten su operación y le aporte mayor versatilidad.

## **Capítulo 9. Bibliografía.**

1. *Seismic retrofit solutions: An overview.* **Clifton, G. C., & Bull, J. F.** 2014.
2. *Life cycle assessment of an automotive factory: Identifying challenges for the decarbonization of automotive production – A case study.* **Malte Gebler, Juan Felipe Cerdas, Sebastian Thiede, Christoph Herrmann.** 122330, s.l. : Journal of Cleaner Production, 2020, Vol. 270. ISSN 0959-6526.
3. *Smart retrofitting in manufacturing: A systematic review.* **David Jaspert, Martin Ebel, Alexej Eckhardt, Jens Poepelbuss.** 127555, s.l. : Journal of Cleaner Production, 2021, Vol. 312. ISSN 0959-6526.
4. *Life-cycle environmental and cost-effective energy retrofitting solutions for office stock.* **Marta Gangolells, Katia Gaspar, Miquel Casals, Jaume Ferré-Bigorra, Nuria Forcada, Marcel Macarulla.** 102319, Sustainable Cities and Society : s.n., 2020, Vol. 61. ISSN 2210-6707.
5. *A HEURISTIC APPROACH TO RETROFIT AND AUTOMATION.* **K. P. Kiran Kumar, S. Nagendra Prasad.** Mysore : International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2014. ISSN: 22311963.
6. *A novel methodology for retrofitting CNC machines based on the context of industry 4.0.* **R. G. Lins, B. Guerreiro, R. Schmitt, J. Sun, M. Corazzim and F. R. Silva.** Vienna : IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017.
7. **Boletín oficial del estado.** *Real decreto 1644/2008.* Madrid : BOE, 2008.
8. —. *DIRECTIVA 2006/42/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 17 de mayo de 2006 relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE (refundición).* s.l. : BOE, 2006.
9. —. *Real Decreto 1435/1992.* MADRID : BOE, 1992.
10. —. *Directiva del Consejo, de 14 de junio de 1989, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre máquinas.* Madrid : BOE, 1989.
11. **Diario oficial de la unión europea.** *Reglamento (UE) 2023/1230 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio de 2023, relativo a las máquinas, y por el que se*

*derogan la Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y la Directiva 73/361/CEE del Consejo. s.l. : DOUE, 2023.*

12. *Development of tool condition monitoring system in end milling process using wavelet features and Hoelder's exponent with machine learning algorithms. T. Mohanraj, Jayanthi Yerchuru, H. Krishnan, R.S. Nithin Aravind, R. Yameni. 108671, s.l. : Measurements, 2021, Vol. 173. ISSN 0263-2241.*

13. **Makita.** *Despiece RP0900 - Fresadora de superficie 8mm.*

14. **Boletín oficial del estado.** *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión e ITC.* Madrid : BOE, 2023.

15. **Boletín Oficial del Estado.** *Real Decreto 1468/1988, de 2 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de etiquetado, presentación y publicidad de los productos industriales destinados a su venta directa a los consumidores y usuarios.* Madrid : BOE, 1988.

16. **Robin.** *Build Your Own CNC Controller. uptimefab.com. 2021.*

17. **Murat Askin, Zane Campise, Daniel Lonczak, Fabian Samano.** *Scope of Work. CNC Retrofits.* San Luis Obispo : California Polytechnic State University, 2023.

18. —. *Critical design review. CNC retrofits.* San Luis Obispo : California Polytechnic State University, 2023.

19. —. *Final design review. CNC retrofits.* San Luis Obispo : California Polytechnic State University, 2023.

20. **Anu Bask, Mervi Lipponen, Mervi Rajahonka, Markku Tinnilä.** *The concept of modularity: diffusion from manufacturing to service production. s.l. : Journal of Manufacturing Technology Management, 2010. ISSN: 1741038X.*

21. **ddcnc.com.** *DDCS V3.1 Manual. 2022.*

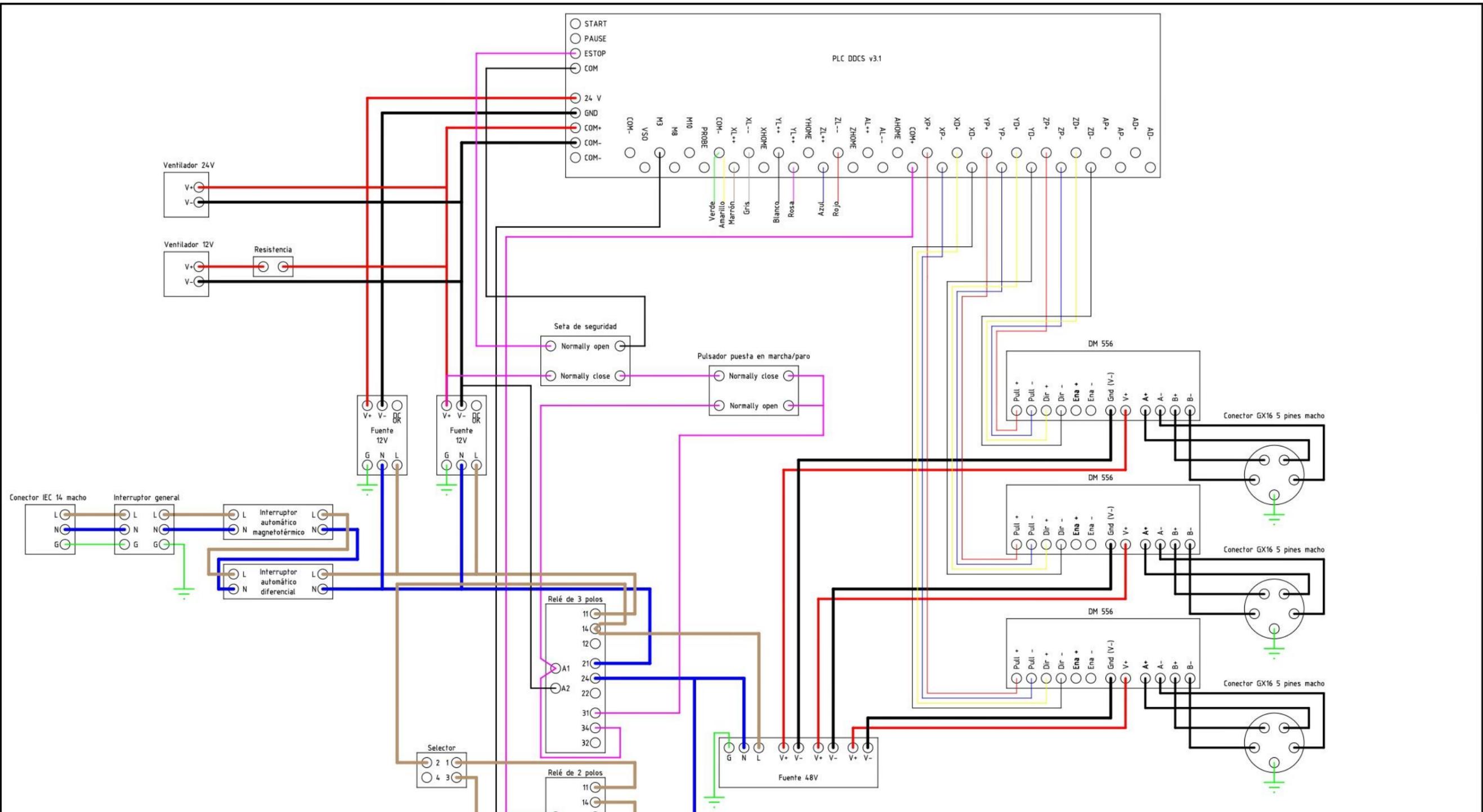
22. **PlanetCNC.** *Motor Driver DM556 . 2022.*

23. **Asociación Española de Normalización.** *UNE-EN 61008-1: Interruptores automáticos diferenciales para uso doméstico y análogo. Parte 1: Reglas generales.* Madrid : AENOR, 2013.

24. *Implementing sustainability in existing building through retrofitting measures.* **Che Husin, Siti, Mohd Zaki, Noor Irza y Abu Husain, Mohd Khairi.** s.l. : International Journal of Civil Engineering and Technology, 2019, Vol. 10.

## **Anexo I. Esquema eléctrico del controlador**

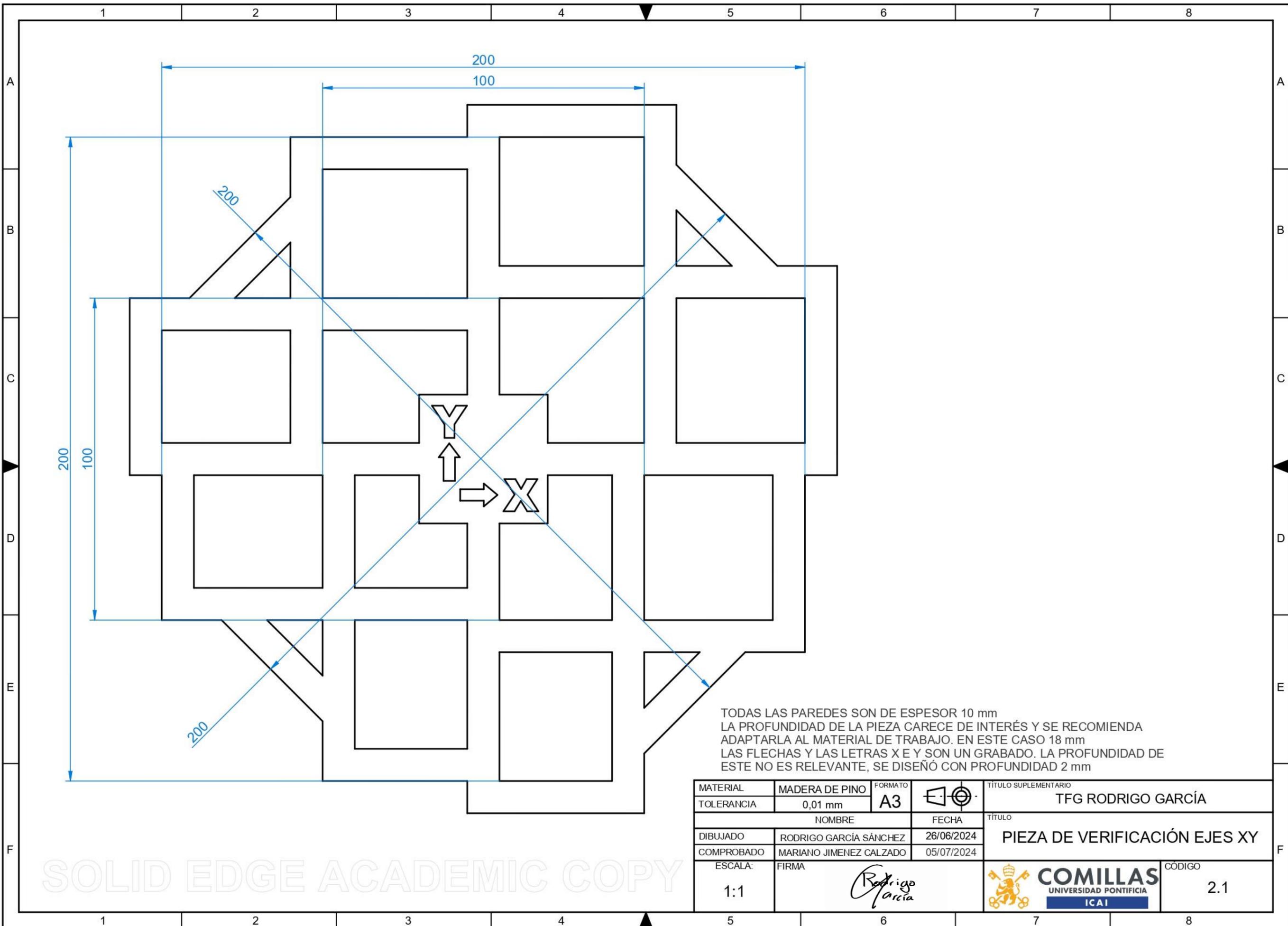
En la siguiente página, se adjunta un esquema en formato A3 con el conexionado eléctrico del controlador. La explicación de este puede encontrarse en el capítulo 3.4.2 *Conexionado eléctrico*. del documento principal



MATERIAL	NA	FORMATO		TÍTULO SUPLEMENTARIO
TOLERANCIA	NA	A3		TFG RODRIGO GARCÍA
NOMBRE			FECHA	TÍTULO
DIBUJADO	RODRIGO GARCÍA SÁNCHEZ	28/06/2024	ESQUEMA ELÉCTRICO	
COMPROBADO	MARIANO JIMÉNEZ CALZADO	05/07/2024		
ESCALA	FIRMA			CÓDIGO
NA				1.1

## **Anexo II. Plano de la pieza de verificación**

En la siguiente página se adjunta el plano de la pieza utilizada en el Capítulo 5. Verificación del diseño. del documento principal



TODAS LAS PAREDES SON DE ESPESOR 10 mm  
 LA PROFUNDIDAD DE LA PIEZA CARECE DE INTERÉS Y SE RECOMIENDA ADAPTARLA AL MATERIAL DE TRABAJO. EN ESTE CASO 18 mm  
 LAS FLECHAS Y LAS LETRAS X E Y SON UN GRABADO. LA PROFUNDIDAD DE ESTE NO ES RELEVANTE, SE DISEÑÓ CON PROFUNDIDAD 2 mm

MATERIAL	MADERA DE PINO	FORMATO	A3	TÍTULO SUPLEMENTARIO	TFG RODRIGO GARCÍA
TOLERANCIA	0,01 mm				
NOMBRE		FECHA		TÍTULO	
DIBUJADO	RODRIGO GARCÍA SÁNCHEZ	26/06/2024		PIEZA DE VERIFICACIÓN EJES XY	
COMPROBADO	MARIANO JIMENEZ CALZADO	05/07/2024			
ESCALA:	FIRMA			CÓDIGO	
1:1				2.1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

## **Anexo III: Tabla de Excel para el ensayo de verificación.**

En la siguiente página se muestra la tabla de Excel completa utilizada en el ensayo de verificación descrito en el Capítulo 5. Verificación del diseño.

	Escala impresión	100%				
Medida	Dimensión esperada	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media 1	Medida 2
1	200	200,40	200,02	200,22	200,2133	200,03
2	200	199,92	199,74	199,86	199,84	
3	100	100,20	100,18	100,20	100,1933	
4	100	100,00	99,94	99,98	99,97333	100,08
5	200	200,12	200,20	200,20	200,1733	200
6	200	199,82	199,84	199,82	199,8267	
7	100	100,40	100,20	100,18	100,26	
8	100	99,98	99,96	99,92	99,95333	100,11
9	200	199,90	199,94	199,96	199,9333	100,11
10	200	200,12	200,14	200,20	200,1533	

	Media 1		Media 2	
	Error [mm]	Error [%]	Error [mm]	Error [%]
Eje X	- 0,213	0,107%	- 0,027	0,01%
	0,160	0,080%		
	- 0,193	0,193%		
	0,027	0,027%		
Eje Y	- 0,173	0,087%	-	0,00%
	0,173	0,087%		
	- 0,260	0,260%		
	0,047	0,047%		
Desalineado [°]	0,063039			

