



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN  
SISTEMA DE CONTROL NUMÉRICO EN LAZO  
ABIERTO PARA UNA FRESADORA  
INDUSTRIAL DE 3 EJES”**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y  
AUTOMÁTICA

**Autor: Israel Gil Gallego**

Director: Rosendo Zamora Pedreño



*Este proyecto se lo dedico  
a mi familia en especial  
a mis padres ya que sin  
ellos no hubiera sido posible  
alcanzar esta meta*



# Agradecimientos

*Quiero incluir este apartado a todas aquellas personas que son tan importantes para mí y que gracias al apoyo, cariño y el tiempo que me han dedicado han hecho posible que hoy esté aquí.*

*En primer lugar agradecer a mis padres, por la educación y fe que me han aportado y por consiguiente el amor y apoyo que hasta día de hoy me han dedicado. Me han enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se puede conseguir.*

*A mis hermanos: David, Ana Isabel, María Teresa y Raquel, por ser la fuente de motivación y esfuerzo más importante para mí.*

*Agradecer también a Sara Silvente Bernal que con cariño ha estado en cada momento a mi lado, apoyándome siempre en todas mis decisiones.*

*Por último a mi tutor Rosendo Zamora Pedreño, porque sin él tampoco habría sido posible sacar adelante este proyecto, ya que me ha aportado su amplio conocimiento y me ha guiado hasta el final.*



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>5</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>15</b>
1.1. Definición y clasificación de la máquina herramienta . . . . .	15
1.2. Evolución histórica . . . . .	17
1.3. Control numérico computerizado (CNC) . . . . .	19
1.3.1. Ventajas y desventajas del CNC . . . . .	19
1.3.2. Características del CNC . . . . .	21
1.3.3. Sistemas de control . . . . .	21
1.4. Objetivos . . . . .	23
1.5. Fases . . . . .	25
<b>2. Estado del arte</b>	<b>27</b>
2.1. Hardware . . . . .	27
2.1.1. Computador . . . . .	27
2.1.1.1. UDOO X86 . . . . .	28
2.1.1.2. Olimex . . . . .	29
2.1.1.3. CubieTech . . . . .	29
2.1.1.4. Radxa . . . . .	30
2.1.1.5. Raspberry Pi 2 Mod. B . . . . .	31
2.1.2. Arduino Uno Rev.3 . . . . .	33
2.1.3. Controladores de los motores . . . . .	35
2.1.3.1. Controlador DRV8825 . . . . .	35
2.1.3.2. Controlador Bipolar TB6600 . . . . .	36
2.1.3.3. Controlador AUDIX Technology . . . . .	37
2.2. Firmware . . . . .	41
2.2.1. Grbl . . . . .	41
2.2.2. Marlin . . . . .	41
2.3. Software . . . . .	42

2.3.1.	Software comercial . . . . .	43
2.3.1.1.	Mach3 . . . . .	43
2.3.2.	Software libre . . . . .	44
2.3.2.1.	TurboCNC . . . . .	44
2.3.2.2.	LinuxCNC . . . . .	44
2.3.2.3.	Grbl controller . . . . .	46
2.3.2.4.	Universal G-code sender . . . . .	46
2.3.2.5.	bCNC . . . . .	47
2.4.	Clasificación de los motores . . . . .	48
2.4.1.	Motores de continua, alterna y servomotores . . . . .	48
2.4.2.	Motores paso a paso (PaP) . . . . .	50
2.4.3.	Tipo de motores paso a paso . . . . .	51
2.4.4.	Configuración de las bobinas del motor PaP . . . . .	53
<b>3.</b>	<b>Metodología</b>	<b>57</b>
3.1.	Análisis mecánico . . . . .	57
3.1.1.	Número de ejes . . . . .	59
3.1.2.	Transmisión del movimiento . . . . .	61
3.1.3.	Caja de velocidades . . . . .	62
3.1.4.	Sistema de refrigeración . . . . .	63
3.1.5.	Canalización de los cables en la estructura . . . . .	63
3.2.	Análisis eléctrico . . . . .	70
3.2.1.	Finales de carrera . . . . .	70
3.2.1.1.	Aislamiento contra el ruido eléctrico o inter- ferencias . . . . .	76
3.2.2.	Motores fresadora Aizpurua T-30-CNC . . . . .	80
3.2.3.	Armario eléctrico . . . . .	83
3.3.	Selección de componentes del sistema de control . . . . .	86
3.3.1.	Selección del hardware . . . . .	87
3.3.2.	Selección del firmware . . . . .	87
3.3.3.	Selección del software . . . . .	88
3.3.4.	Fuente conmutada de los controladores . . . . .	88
3.3.5.	Fuente ATX . . . . .	89
3.3.6.	Periféricos . . . . .	90
3.4.	Selección del diseño . . . . .	92
3.4.1.	Configuración horizontal . . . . .	93
3.4.1.1.	MODELO N°1 H . . . . .	93
3.4.2.	Configuración vertical . . . . .	93
3.4.2.1.	Modelo N°1 V . . . . .	94
3.4.2.2.	Modelo N°2 V . . . . .	96
3.4.2.3.	Modelo N°3 V . . . . .	97

3.5. Montaje del armario de control . . . . .	100
3.5.1. Mecanizado de la caja . . . . .	100
3.5.2. Montaje del conjunto electrónico . . . . .	104
3.6. Cableado y conexionado . . . . .	106
3.6.1. Orden y distribución . . . . .	106
3.6.2. Alimentación monofásica . . . . .	110
3.6.3. Conexionado e identificación . . . . .	110
3.6.4. Activación del motor principal . . . . .	115
3.7. Instalación y configuración del software . . . . .	118
3.7.1. Programación de la Raspberry Pi . . . . .	118
3.7.2. Programación de Arduino Uno . . . . .	121
3.7.3. Configuración Grbl . . . . .	125
<b>4. Verificación y pruebas de funcionamiento</b>	<b>129</b>
4.1. Verificación . . . . .	129
4.1.1. Tipo de errores . . . . .	129
4.1.1.1. Juego . . . . .	130
4.1.1.2. Pérdida de pasos . . . . .	131
4.1.2. Procedimiento . . . . .	131
4.1.3. Ensayos realizados . . . . .	133
4.1.3.1. Resultados . . . . .	134
4.2. Pruebas de funcionamiento . . . . .	138
<b>5. Memoria económica</b>	<b>145</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>147</b>
<b>7. Anexos</b>	<b>153</b>



# Índice de figuras

1.1.	Clasificación de las máquinas herramienta . . . . .	16
1.2.	Catálogo de fresadoras AIZPURUA de 1981 . . . . .	19
1.3.	Esquema de un control en lazo cerrado . . . . .	22
1.4.	Esquema de un control en lazo abierto . . . . .	23
1.5.	Aizpurua-T30-CNC con antiguo sistema de control . . . . .	24
2.1.	Computador UDOO x86 . . . . .	28
2.2.	Computador oLimex . . . . .	29
2.3.	Computador Cubieboard . . . . .	30
2.4.	Tarjeta minipc Radxa . . . . .	31
2.5.	Tarjeta minipc Raspberry pi 2 . . . . .	32
2.6.	Arduino Uno Rev.3 . . . . .	33
2.7.	Controlador Pololu DRV8825 . . . . .	35
2.8.	Controlador bipolar TB6600 . . . . .	36
2.9.	Controlador bipolar AUDIX Technology . . . . .	37
2.10.	Ajuste de los pasos de los controladores AUDIX Technology . . . . .	38
2.11.	Ajuste de intensidad mediante potenciómetro de los controladores AUDIX Technology . . . . .	39
2.12.	Esquema de conexión de los controladores AUDIX Technology . . . . .	39
2.13.	Interfaz gráfica Mach3 . . . . .	44
2.14.	Interfaz gráfica TurboCNC . . . . .	45
2.15.	Interfaz gráfica LinuxCNC . . . . .	45
2.16.	Interfaz gráfica Grbl Controller . . . . .	46
2.17.	Interfaz gráfica de Universal G-code sender . . . . .	47
2.18.	Interfaz gráfica bCNC . . . . .	48
2.19.	Motor de corriente continua . . . . .	49
2.20.	Motor de corriente alterna . . . . .	49
2.21.	Servomotor . . . . .	50
2.22.	Motor paso a paso . . . . .	51
2.23.	Rotor y estátor de un motor PAP de reluctancia variable . . . . .	52
2.24.	Rotor y estátor de un motor PAP de imanes permanentes . . . . .	52

2.25. Rotor y estator de un motor PAP híbrido, detalle de los dientes	53
2.26. Configuración unipolar de las bobinas del estátor	53
2.27. Configuración bipolar-serie de las bobinas del estátor	54
2.28. Configuración bipolar-paralelo de las bobinas del estátor	55
3.1. Principales componentes mecánicos de la fresadora Aizpurua T-30-CNC	58
3.2. Tipos de desplazamiento sobre el eje Z	59
3.3. Movimientos básicos de una fresadora de tres ejes	60
3.4. Articulación para la orientación angular del cabezal	61
3.5. Husillo de bolas	61
3.6. Husillo de bolas del eje X de la fresadora Aizpurua T-30-CNC	62
3.7. Caja de transmisión de la fresadora Aizpurua T-30-CNC	63
3.8. Orificios presentes en toda la estructura de la fresadora Aizpurua T-30-CNC	64
3.9. Esquema de unión de los orificios	65
3.10. Tubo flexible de PVC reforzado	66
3.11. Tuerca de unión entre el tubo y el motor	66
3.12. Pieza que acopla el tubo a la estructura	67
3.13. Impresora 3D LemonBot	67
3.14. A la izquierda modelo 3D de la rosca renderizado, a la derecha modelo impreso	68
3.15. Modelo tornillo y tuerca que son unidos a presión	69
3.16. Canalización parte superior a la izquierda, y parte inferior a la derecha	69
3.17. Final de carrera mecánico con pistón	70
3.18. Final de carrera del eje X	72
3.19. Final de carrera del eje Z	72
3.20. Final de carrera del eje Y	73
3.21. Final de carrera mecánico sin pistón metálico	73
3.22. Colocación y toma de medidas del nuevo sensor	74
3.23. Modelo 3D del tope mecánico diseñado a la izquierda y tope mecanizado a la derecha	74
3.24. Topes montados	75
3.25. Detalle del taco situado en el eje Z	75
3.26. Cable apantallado	78
3.27. Placa con relés	78
3.28. Esquema de conexiones de los relés	79
3.29. Motor montado en la fresadora Aizpurua T-30-CNC	80
3.30. Detalle de los cables que salen de las bobinas del motor	81
3.31. Colocación del motor ya cableado	81

3.32. Armario eléctrico de la fresadora Aizpurua T-30-CNC . . . . .	83
3.33. Guardamotor magnetotérmico . . . . .	84
3.34. Interruptor termomagnético . . . . .	84
3.35. Contactor . . . . .	85
3.36. Conector auxiliar . . . . .	86
3.37. Fuente conmutada para la alimentación de los controladores . . . . .	88
3.38. Fuente de alimentación ATX . . . . .	89
3.39. Periferico de Entrada . . . . .	91
3.40. Periferico de salida (Monitor) . . . . .	92
3.41. Modelo N°1 del armario de control . . . . .	93
3.42. Modelo N°1 del armario de control . . . . .	95
3.43. Modelo N°2 del armario de control . . . . .	96
3.44. Vista frontal del armario de control . . . . .	97
3.45. Vistas laterales del armario de control modelo N°3 V (primera imagen lateral izquierdo) . . . . .	98
3.46. Diseño de la rejilla protectora del ventilador . . . . .	99
3.47. Vista superior del armario de control . . . . .	99
3.48. Taladros para sujetar fuente de alimentación de los controladores	100
3.49. Secciones superiores de fijación de ventiladores y VGA . . . . .	101
3.50. Orificio acople USB a mecanizar . . . . .	102
3.51. Posición de las patas de apoyo . . . . .	103
3.52. Posición final de la caja . . . . .	103
3.53. Marcación de los taladros a realizar en la plancha . . . . .	104
3.54. Bases en ABS; izquierda Raspberry Pi, derecha Arduino . . . . .	105
3.55. Presentación de los componentes montados en la plancha . . . . .	106
3.56. Tapadera del armario eléctrico preparada para taladrar . . . . .	107
3.57. División del cableado que asciende al armario de control . . . . .	108
3.58. Canaletas para la distribución del cableado . . . . .	108
3.59. Detalle de las conexiones del controlador . . . . .	111
3.60. Armario de control ensamblado . . . . .	112
3.61. Vista lateral izquierda . . . . .	113
3.62. Vista lateral derecha del armario cerrado; detalle del puerto usb	113
3.63. Vista superior del armario de control. Detalle de las rejillas de ventilación . . . . .	114
3.64. Accionamientos funcionales del panel de control . . . . .	115
3.65. Relés controladores del motor . . . . .	116
3.66. Alimentación con dos fuentes . . . . .	117
3.67. Menú principal de configuración de la Raspberry . . . . .	119
3.68. Configuración pines Arduino . . . . .	121
3.69. Importar librería Zip . . . . .	122
3.70. Seleccionando la carpeta Grbl . . . . .	123

3.71. Cargando en el IDE el archivo generado . . . . .	124
3.72. Menú principal bCNC . . . . .	125
3.73. Servidor web . . . . .	128
3.74. Visualización del servidor . . . . .	128
4.1. Juego producido en un husillo convencional . . . . .	130
4.2. Backlash producido en un husillo de bolas . . . . .	131
4.3. Palpador digital Garant . . . . .	132
4.4. Posición inicial y final de palpado . . . . .	133
4.5. Representación del error del eje X a diferentes avances . . . . .	136
4.6. Representación del error del eje Y a diferentes avances . . . . .	137
4.7. Figura de prueba a mecanizar . . . . .	138
4.8. Perfil del diseño . . . . .	139
4.9. Caminos de herramienta generados por CamWorks . . . . .	140
4.10. Preparación del material bruto . . . . .	141
4.11. Desbaste con la fresa de 10mm . . . . .	142
4.12. Proceso de acabado final con la fresa de 10mm . . . . .	142
4.13. Acabado del mecanizado . . . . .	143

# Capítulo 1

## Introducción

El 12 de Julio de 2001, IZAR propulsión y energía motores, actualmente NAVANTIA S.A. donó al Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena una fresadora CNC que estuvo trabajando desde los años 80 en dicha empresa. El sistema de control del que dispone la máquina herramienta es muy antiguo, está averiado y no es posible su reparación. Dicha máquina dispone de motores paso a paso que funcionan correctamente y dispone de todos sus elementos mecánicos necesarios para su funcionamiento. Al estar estropeada la fresadora se disponen de dos opciones: adquirir una máquina herramienta nueva o reducir costes reutilizando los elementos que se disponen con el consiguiente reemplazamiento de útiles para la mejora de funcionalidad y extensión de la vida de la misma. Renovando la arquitectura del controlador y la interfaz del usuario, algunas máquinas herramienta pueden seguir siendo útiles herramientas de manufactura. Según esto, se ha decidido diseñar, adquirir e instalar un nuevo sistema de CNC en lazo abierto para recuperar las antiguas funcionalidades de la máquina mejorando de forma sustancial las posibilidades de programación y añadiendo la posibilidad de uso mediante software de CAD/CAM.

### 1.1. Definición y clasificación de la máquina herramienta

Existen numerosas definiciones de máquina herramienta y del sector que las comprende [3]. Una de carácter muy general, pero que puede ayudar a entender de algún modo el sector, dice que "la máquina herramienta es un tipo de utensilio que se utiliza para dar forma a piezas sólidas, principalmente metales". Una definición más detallada y precisa la describiría como un conjunto de órganos y elementos dispuestos para la transformación mecánicogeométri-

ca de diversos materiales sólidos” (Aldabaldetrecu, 1982). Pero, sin lugar a dudas, la definición más utilizada actualmente es la del Comité Europeo de Cooperación de las Industrias de las máquinas herramienta, CECIMO, que las describe como ”las máquinas no portables que operadas por una fuente exterior de energía conforman los metales, por arranque de viruta, abrasión, choque, presión, procedimientos eléctricos o una combinación de los anteriores”.

En cuanto a la clasificación de las máquinas herramienta, nos volvemos a encontrar ante numerosas posibilidades, desde su carácter más o menos convencional hasta la separación en función del movimiento circular o rectilíneo que realizan. En nuestro caso, hemos decidido clasificarlo en virtud de las funciones que desempeñan, siguiendo de nuevo a CECIMO.

MAQUINAS-HERRAMIENTA			
A. Arranque de viruta		B. Deformación y corte	
A1. Por herramienta metálica	A2. Por abrasión y fenómenos eléctricos	B1. Deformación por presión y choque	B2. Corte por presión
A10. Tornos	A21. Rectificadoras y bruñidoras	B11. Prensas mecánicas	B21. Cizallas, tijeras, entalladoras y punzonadoras
A11. Fresadoras	A22. Afiladoras	B12. Prensas hidráulicas y oleo-neumáticas	
A12. Taladradoras	A23. Pulidoras, lijadoras y amoladoras	B13. Maquinas para forjar	
A13. Roscadoras	A24. Maquinas de electroerosión y otros fenómenos eléctricos	B14. Maquinas para trabajar el alambre	
A14. Mandrinadoras		B15. Maquinas para ensayos	
A15. Cepillos, limadoras		B16. maquinas para fabricar tornillos, bulones y tuercas	
A16. Maquinas especiales y transfer		B17. Maquinas para trabajar la chapa	
A17. Centros de mecanizado		B18. Maquinas para conformar los metales en barras, perfiles y tubos	
A18. Sierras y maquinas de limar			
A19. Maquinas para fabricación de engranajes			

Figura 1.1: Clasificación de las máquinas herramienta

Como se puede apreciar en la figura 1.1, las máquinas herramienta se dividen en dos grupos, las de arranque de viruta y las de deformación y corte. Cada uno de ellos se puede dividir a su vez en dos subgrupos, dependiendo de las características y destino de la máquina en cuestión. El arranque de viruta puede realizarse por herramienta metálica o por abrasión y fenómenos eléctricos. Mientras la deformación y corte pueden lograrse, la primera por presión y choque, y el segundo por simple presión.

## 1.2. Evolución histórica

Las primeras máquinas y mecanismos sirvieron básicamente para la molienda de grano, que inicialmente se realizaba con un mortero hasta que pasó a realizarse con un molino de rotación. Entre ellas merece ser destacada la rueda hidráulica, que durante muchos siglos solo se utilizó para la molienda de cereales pero terminó siendo una auténtica fuente de energía. Se descubrió también otra fuente de energía hasta entonces desconocida, como el molino de viento. Pero el precedente histórico más importante de lo que hoy son las máquinas herramienta es, hacia el año 1.250, el desarrollo del torno por medio de un novedoso sistema de propulsión que se debe a una mejora sobre el torno accionado por arco. Se denominaba como torno de varal, que cuando se accionaba con el pie ofrecía total disponibilidad de las manos para el posterior manejo de la herramienta.

El torno ha sufrido una constante evolución a lo largo de la historia pero, remontándonos a 1.480, el pedal fue combinado con un vástago y una biela. Lo que sirvió para darle movimiento y transmitirlo a un mecanismo capaz de transformar el movimiento de vaivén en uno de rotación y viceversa. El torno de giro continuo fue una mejora del anterior y posteriores variaciones se produjeron a partir del siglo XVI, en el que se introdujeron elementos de fundición, tales como la rueda, los soportes del eje principal, el apoyo de la herramienta y, hacia el 1.568, el mandril, una pieza cilíndrica que asegura lo que posteriormente se va a torrear.

Durante la Primera Revolución Industrial se desarrollaron las nuevas máquinas y se expandió su utilización. En general, el modelo de industrialización arranca con la máquina de vapor y el desarrollo de la industria textil; a continuación se produce una etapa de mejora de los transportes y aparecen las máquinas herramienta, la industria pesada y otras más complejas como la metalúrgica, química y eléctrica. Entre las máquinas que tuvieron importancia durante la Primera Revolución Industrial destacan los tornos, las mandrinadoras, los primeros cepillos y mortajadoras, las fresadoras y la prensa hidráulica.

Conforme va pasando el tiempo, se va viendo la influencia que ha tenido la máquina herramienta en elementos cotidianos. El siglo XX comienza con el fuerte desarrollo de la industria del automóvil, vehículo que ha influido inmensamente en el desarrollo cualitativo y cuantitativo del sector.

En esta época es cuando se empiezan a fabricar máquinas en el País Vasco, aunque con mucho retraso y de manera tímida y limitada a modelos sencillos y de gran consumo. La fabricación se inicia en Gipuzkoa y es entonces cuando se registra un cambio de mentalidad, puesto que las empresas empiezan a preocuparse por la organización del trabajo, creando compañías especializadas para elaborar estudios para la mejora de métodos de fabricación y aplicación de tiempos de trabajo. Además, la situación favorable de la economía en 1960 y la primera Feria de máquinas herramienta en Bilbao (1961), fue un impulso para la exportación y favoreció la creación de nuevas empresas de este sector.

En el año 1960, se establece un taller mecánico, en el barrio de la Estación, a nombre de Simón Aizpurua Albizuri para dar empleo a sus cinco hijos. Seis años más tarde se constituye en Aizpurua Apestegui, S.L., para transformarse en Talleres Aizape, S.A., el año 1983. Si bien en un principio se dedicaron a la mecanización de piezas sobre encargo, pronto evolucionaron hacia el diseño y fabricación de fresadoras. El año 1981 lanzaron un nuevo modelo de taladro-fresadora, el modelo TF-30, que fue registrado en la Oficina de Patentes y Marcas, con el modelo de utilidad con el número U257985.

El modelo de fresadora que se dispone actualmente gracias a la donación de IZAR PROPULSION Y ENERGÍA MOTORES es el MOD. TF-30-CNC que se puede apreciar en la Fig. 1.2



Figura 1.2: Catálogo de fresadoras AIZPURUA de 1981

### 1.3. Control numérico computerizado (CNC)

Control numérico significa, control en base a códigos numéricos que especifica tanto la posición relativa de la herramienta y de la pieza como otros factores importantes que intervienen. El CNC surge a partir de la creación de los microprocesadores, y esto conlleva consigo la ventaja de que los programas podían ser desarrollados así como guardados en la misma máquina. Debido a su control digital, estas máquinas presentan un alto grado de flexibilidad.

#### 1.3.1. Ventajas y desventajas del CNC

Entre las ventajas más características de los CNC se encuentran:

- Reducción de la intervención del operador en la producción de las piezas dejando al operador tiempo libre para hacer otras tareas incluso puede

manejar de varias máquinas a la vez, trayendo de esta forma beneficios como: reducción de fatiga, disminución de errores humanos, tiempo de maquinado consistente y predecible para cada pieza, se genera una gran productividad debido a que todas las operaciones se realizan en condiciones óptimas, reduciendo los tiempos muertos.

- Flexibilidad, esto quiere decir que elaborar piezas diferentes es muy fácil, como estas máquinas se operan desde programas, al operar una pieza de trabajo diferente es tan fácil como cargar un programa diferente, por ejemplo una vez que se crea y verifica un programa se ejecuta para la primera producción, si en otro momento se está ejecutando un programa con una pieza diferente, será fácil llamarlo nuevamente la siguiente vez que la pieza de trabajo se requiera hacer, únicamente cargando de nuevo el programa.
- Exactitud y respetabilidad de especificaciones, ya que, una vez elaborado y verificado el programa, puede reproducirse infinidad de piezas iguales con gran exactitud.
- Permite la fabricación de piezas con superficies tridimensionales, como moldes para la inyección de plástico y en construcciones aeronáuticas.
- Reducción de los costos del inventario, así como la fácil administración de la producción e inventario lo cual permite la determinación de objetivos o políticas de la empresa.
- Permite simular el proceso de corte a fin de verificar que éste sea correcto.

Entre las desventajas más destacadas del CNC se encuentran:

- Adquirir la maquinaria requiere una gran inversión inicial.
- Los costes de mantenimiento aumentan, ya que el sistema de control es más complicado y surge la necesidad de entrenar al personal de servicio y operación.
- La planificación debe ser más detallada y rigurosa, ya que es necesario programar en forma correcta la selección de las herramientas de corte y la secuencia de operación para un eficiente funcionamiento.

### 1.3.2. Características del CNC

Las máquinas CNC pueden contar con varios ejes de movimiento. Estos ejes se motorizan para los desplazamientos de los carros según sus ejes principales. El tipo de movimiento puede ser angular, lineal o circular, la cantidad de movimientos y la rapidez de movimiento son programables en todas las máquinas herramienta CNC. La mayoría de las máquinas tienen otras funciones que se pueden programar, combinando estas funciones adecuadamente para los maquinados necesarios se puede obtener excelentes resultados de los trabajos requeridos. Cuando se habla de CNC, se dice del proceso de la eficiencia y mejora de calidad de un sistema de manufactura. La eficiencia puede medirse con tres criterios básicos:

- Costo de manufactura: comprende el costo de mecanizado, ensamblaje, transporte y almacenamiento temporal así como es afectado por la integración de los procesos empleados, la mano de obra y la calidad que se pretenda alcanzar.
- Productividad: habla de la eficiencia con la que se usa la mano de obra, un solo operario puede tener o no experiencia en el manejo de máquinas CNC ya que estas máquinas son automáticas haciendo inclusive el manejo de más de una de estas al mismo tiempo.
- Utilidad: se afecta por los cambios en los costes de manufactura o en la productividad.

Se sabe que estos tres criterios están relacionados pero no pueden maximizarse simultáneamente.

### 1.3.3. Sistemas de control

Se define sistema de control como aquel que se caracteriza por la presencia de ciertos elementos que influyen en el comportamiento del sistema, administrando, ordenando, dirigiendo o regulando su comportamiento teniendo un dominio sobre las variables de salida de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna), con la finalidad de reducir las probabilidades de fallo y obteniendo los resultados deseados. Pueden distinguirse dos tipos de sistemas de control en función de la información utilizada para calcular la acción de control del sistema, de lazo abierto y lazo cerrado. Una máquina CNC puede usar cualquiera de los dos sistemas de control, de lazo cerrado o de lazo abierto.

En los sistemas de control en lazo cerrado, la acción de control de entrada está, en cierto modo, en función de la señal de salida. Este control permite la corrección de los errores cometidos mediante la implantación de un lazo que retroalimenta la entrada permitiendo comparar las dos señales (entrada y salida) determinando los errores cometidos y así aplicando una corrección en la nueva señal de entrada. Este lazo es muy importante cuando el sistema a controlar depende de la precisión. Los rasgos más importantes que tiene la presencia de realimentación son:

- Aumento de la exactitud (habilidad para reproducir la entrada fielmente).
- Reducción de la sensibilidad de la salida correspondiente a una determinada entrada ante variaciones en las características del sistema.
- Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de banda).
- Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

Este sistema se muestra en la figura 1.3.



Figura 1.3: Esquema de un control en lazo cerrado

Se dice que un sistema está a lazo abierto cuando las entradas no son afectadas o modificadas por los valores en las salidas. Para calcular la señal que se va a aplicar en la entrada es conveniente conocer la dinámica del sistema, las consignas del mismo y las perturbaciones que le puedan afectar, ya que en estos sistemas no hay retroalimentación para que el controlador

pueda comparar la señal de salida con la de entrada y pueda ajustar la acción de control. Entre las características más relevantes de este tipo de lazo se encuentra su sencillez, la desventaja de que estos sistemas no aseguran la estabilidad ante una perturbación, no poder comparar la salida con la entrada para ejercer una acción correctora, el hecho de que las perturbaciones puedan ser tangibles o intangibles y la carencia de precisión, ya que ésta, depende de la previa calibración del sistema. (Ver Fig. 1.4)

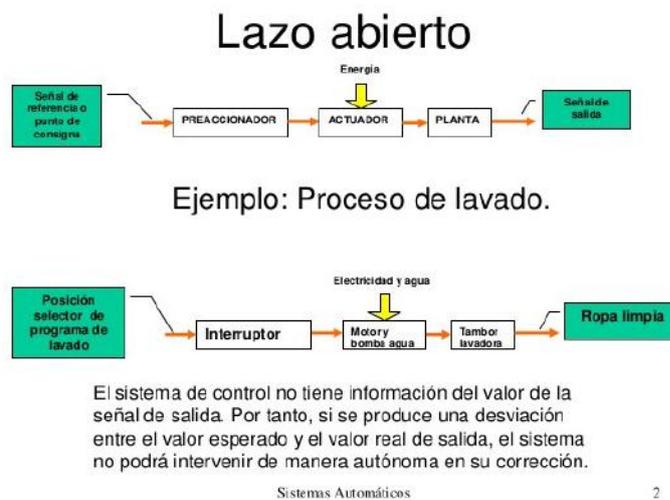


Figura 1.4: Esquema de un control en lazo abierto

Por otro lado tiene las ventajas de ser un sistema de control suficiente y sencillo de implementar en cualquier máquina que no requiera una gran exigencia en cuanto a todo lo anterior dicho. Pero es una gran opción si se quiere obtener un buen control relacionando la calidad con el precio de obtención de este sistema.

## 1.4. Objetivos

En este apartado se trata de exponer con claridad los objetivos principales en los que se va a asentar este proyecto. Teniendo en cuenta la finalidad del mismo (automatizar la fresadora industrial), para llegar al objetivo principal se marcan unas pautas, las cuales durante el avance del mismo pueden variar de manera que afecte al proyecto de forma positiva incurriendo en mejoras notables.

- Objetivo principal: dotar a una antigua fresadora industrial de tres ejes de un nuevo sistema de control numérico en lazo abierto, la cual está disponible en el laboratorio de Máquinas y Herramientas del Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación. (Ver Fig. 1.5)



Figura 1.5: Aizpurua-T30-CNC con antiguo sistema de control

- El proyecto será construido teniendo en cuenta las limitaciones físicas y mecánicas referentes a la máquina CNC del proyecto.
- Es importante procurar obtener la máxima relación calidad/precio en todos los componentes presentes en el proyecto, con el objetivo primordial de conseguir completar la construcción de un sistema de control de calidad a un precio competitivo.
- Se implantará una metodología *Open Source* en la medida de lo posible que todos los elementos de control y el software utilizado como alternativa fiable al software propietario. Esto implica los beneficios claros que van desde su menor coste hasta el evitar la dependencia de un único proveedor, disponer del código fuente en caso de desaparición de la empresa suministradora y la posibilidad de influir y apoyar en la dirección del proyecto. Estas ventajas, especialmente la primera, cobran mayor relevancia en tiempos de crisis económica, por lo cual es de esperar que el *Open Source* multiplique su importancia y presencia en los próximos años.

- La instalación de los componentes de control debe de realizarse de manera que pueda adaptarse a futuras mejoras e innovaciones sin tener que incurrir en tareas costosas. Esto permitirá ganar al mismo tiempo en seguridad y mantenimiento del sistema.
- Reducir en la medida de lo posible la presencia de errores dimensionales en el proceso de mecanizado de la fresadora.
- Autonomía y seguridad: la máquina debe ser capaz de llevar a cabo con éxito dilatadas tareas de mecanizado sin la supervisión presencial continua del operario y sin poner en riesgo su propia integridad física.
- Preparar la máquina para su operación con software de tipo CAD/CAM, debido a la importancia que suponen estos procesos en la industria actual.

## 1.5. Fases

Para llevar a cabo estos objetivos se precisa de una organización en base a tareas, realizando así una guía de los pasos a seguir desde el inicio de nuestro proyecto para llevarlo a su consecución.

- FASE DE INVESTIGACIÓN. En esta fase es importante estudiar las características mecánicas y físicas de la máquina a modificar. De esta manera se puede obtener información útil a la hora de investigar los componentes necesarios para la realización del proyecto. Esta etapa conviene que sea totalmente independiente a la adquisición de componentes ya que antes hay que conocer con total seguridad que características que se están buscando.
- SELECCIÓN DE COMPONENTES Y PRIMERAS ADQUISICIONES: Una vez acotadas las características físicas y mecánicas de la máquina CNC se empezará a buscar en el mercado los componentes necesarios que se adapten al proyecto. Para ello se hará uso de los catálogos disponibles para seleccionar los que sean más adecuados. Por otro lado, la ventaja que supone la selección previa de materiales, es la simultaneidad productiva, ya que en numerosas ocasiones el procesamiento y entrega de materiales puede llegar a durar semanas; semanas que pueden emplearse en el desarrollo de los planos en base a las medidas estandarizadas del producto recogidas en el catálogo del fabricante que nos lo suministra.

- **ELABORACIÓN DE LOS PLANOS.** Es importante la elaboración de unos planos conocidos todas las dimensiones tanto de los componentes adquiridos como de la estructura que los contiene y piezas diseñadas y fabricadas. En este apartado se empleará en softwares de diseño para elaborar los planos (SolidWorks), así como para elevar el estado de diseño pasando a la fase de detalle, ya que hay que contemplar en ella la presencia de todos los componentes que van a conformar la totalidad del sistema de control. El desarrollo de esta fase ira íntimamente unido a la norma internacional y los estándares con el objetivo de poder llevar a cabo la sustitución de componentes de forma sencilla.
- **SISTEMA DE CONTROL, CABLEADO Y CONEXIONADO.** Una vez lista la estructura sobre la que montar los elementos de control y seguridad, se procederá a instalar y configurar los elementos de control, así como a definir la distribución del cableado con el propósito de elaborar un método sencillo de mantenimiento e identificación de conexiones. Una vez terminada la distribución y agrupamiento del cableado, se iniciará el conexionado de todos los componentes con la caja de control.
- **CONFIGURACIÓN.** Tras el conexionado de todos los elementos eléctricos presentes en la máquina, se procederá a la instalación y configuración previa de los parámetros de control.
- **VERIFICACIÓN.** Se realizaran pruebas de funcionamiento de la fresadora, tanto en vacío para ajustar el sistema de control con trayectorias básicas, como en carga, verificando su resolución, la precisión de posicionamiento y repetibilidad en los 3 ejes así como las velocidades de avance máximas tanto en vacío como en carga.
- **PRUEBA DE MECANIZADO.** Se ejecutará un programa completo de mecanizado de una pieza en 3D.

# Capítulo 2

## Estado del arte

Hoy en día existen infinidad de posibilidades para dotar a una máquina con un control que sea fiable, robusto, que tenga una calidad suficientemente alta por un precio relativamente bajo y que pueda realizar las mismas tareas que una máquina CNC que tenga un sistema de control industrial. Por todo esto se van a analizar en este apartado todas las soluciones posibles que puedan encontrarse presentes en el mercado, y así realizar análisis comparativos entre nuestro sistema de control final y los ya existentes, intentando solucionar los posibles problemas que puedan haberle surgido a los que ya crearon un sistema de control similar.

### 2.1. Hardware

La opción por la que se va a optar en este proyecto es la de equipar la máquina CNC con un hardware que sea capaz de realizar la traducción del G-code y envío de órdenes a la fresadora CNC de forma rápida y sin necesidad de utilizar un ordenador pc, ya que no es idónea su situación junto a las máquinas herramienta. Para crear un sistema capaz de controlar una máquina de control numérico, se deben de conocer los elementos físicos de control necesarios: computador, controladores para los motores, generador de pulsos. Conocido parte del sistema de control, falta analizar cuales de los minis ordenadores disponibles en el mercado sería el más viable en nuestro caso, teniendo en cuenta el nivel de rendimiento que se precise.

#### 2.1.1. Computador

En esta sección se verán las tarjetas que hoy en día compiten por ser la principal alternativa a un ordenador comercial, por su puesto, mucho más

barato. Hay multitud de fabricantes que ofrecen sus propias alternativas de computadores. El precio varía en función del hardware que incorpora y de la marca, evidentemente, así como las conexiones para ampliar sus posibilidades con otro tipo de extras.

#### 2.1.1.1. UDOO X86

UDOO X68 es un dispositivo capaz de ejecutar todos los programas y los videojuegos disponibles para PC, que además es compatible con Arduino 101, de forma que también puede ejecutar el software para esta plataforma. Es compatible con cualquier sistema operativo de 64 bits, así que se puede instalar cualquier distribución Linux X86, Android o Windows 7, 8.1 y hasta la última versión Windows 10. Las características de sus modelos se muestran en la tabla 2.1.



Figura 2.1: Computador UDOO x86

Tabla 2.1: Comparación entre los dos modelos UDOO x84

UDOO x84	UDOO x84 Advanced
2.0 GHz	2.4 GHz
Quadcore	Quadcore
2 GB RAM	4 GB RAM Dual channel
3x USB 3.0	3x USB 3.0
1x HDMI	1x HDMI
2x mini DP++	2x mini DP++
Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
sin Wi-Fi ni Bluetooth	sin Wi-Fi ni Bluetooth
SATA	SATA
GPIO x 20	GPIO x 20

### 2.1.1.2. OLimex

Esta fabricante cuenta con tres modelos que van desde 30 hasta 70 euros según la configuración de hardware. Cuentan con procesador de uno o dos núcleos, puerto Ethernet y dos conexiones USB. Las características de sus modelos se muestran en la tabla 2.2.



Figura 2.2: Computador oLimex

Tabla 2.2: Comparación del hardware de los tres modelos de Olimex

<b>OLinuXino A10 Lime</b>	<b>OLinuXino A20 Lime</b>	<b>OLinuXino A30 Lime</b>
1000 MHz	1000 MHz	1000 MHz
single core	dual core	dual core
512 MB RAM	512 MB RAM	1 GB RAM
USB x 2	USB x 2	USB x 2
100 Mbit Ethernet	100 Mbit Ethernet	1000 Mbit Ethernet
sin Wi-Fi ni Bluetooth	sin Wi-Fi ni Bluetooth	sin Wi-Fi ni Bluetooth
SATA	SATA	SATA
GPIO x 160	GPIO x 160	GPIO x 160

### 2.1.1.3. CubieTech

Las alternativas de este fabricante no son especialmente económicas, sus computadores parten desde los 60 hasta casi 120 euros, también con placas

de uno o dos núcleos, aunque acompañadas de 1 ó 2 GB de memoria RAM. Las características de sus modelos se muestran en la tabla 2.3.

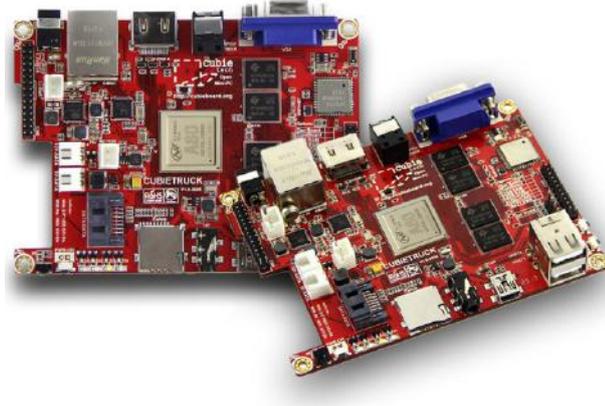


Figura 2.3: Computador Cubieboard

Tabla 2.3: Comparación del hardware de los tres modelos de Cubieboard

<b>Cubieboard</b>	<b>Cubieboard2</b>	<b>Cubietruck Cubieboard3</b>
1000 MHz	1000 MHz	1000 MHz
single core	dual core	dual core
1 GB RAM	1 GB RAM	2 GB RAM
USB x 2	USB x 2	USB x 2
100 Mbit Ethernet	100 Mbit Ethernet	1000 Mbit Ethernet
sin Wi-Fi ni Bluetooth	sin Wi-Fi ni Bluetooth	Wi-Fi y Bluetooth
SATA	SATA	SATA
GPIO x 67	GPIO x 67	GPIO x 54

#### 2.1.1.4. Radxa

El fabricante Radxa nos ofrece el modelo Rock Lite, que cuenta con cuatro núcleos de procesador acompañado de 2 GB de memoria RAM, así como dos conectores de tipo USB. Las características de sus modelos se muestran en la tabla 2.4.



Figura 2.4: Tarjeta minipc Radxa

Tabla 2.4: Características Radxa

<b>Radxa</b>
1600 MHz
quad core
2 GB RAM
Sin NAND Flash
USB x 2
HDMI estandar
100 Mbit Ethernet
Wi-Fi pero sin Bluetooth
sin SATA
GPIO x 80

#### 2.1.1.5. Raspberry Pi 2 Mod. B

Es otra tarjeta de ordenador de bajo costo que se conecta a un monitor de ordenador o un televisor, y utiliza un teclado y un ratón estándar [7]. Es un dispositivo que permite a las personas de todas las edades explorar la computación, y aprender a programar en lenguajes como Scratch y Python. Es capaz de hacer todo lo que se espera que un ordenador de sobremesa puede hacer, desde navegar por Internet y reproducción de vídeo de alta definición, hasta hacer de hojas de cálculo, procesador de textos, y jugar. Raspberry Pi juega con una baza: es el producto de éxito respecto de las demás, y esto le permite ofrecer no sólo una calidad/precio excelente, también muchas más posibilidades que el resto. Una de las claves está en la comunidad, y ahí las RPI tienen a su favor miles de usuarios que dan soporte o publican software, guías de uso o instalación.



Figura 2.5: Tarjeta minipc Raspberry pi 2

Desde su lanzamiento en el año 2012 la tarjeta ha ido evolucionando, mejorando sus especificaciones en cuanto a hardware se refiere. Existen diversas versiones: Raspberry Pi 1 Modelo A, Raspberry Pi 1 Modelo B, Raspberry Pi 1 Modelo B +, Raspberry Pi 2 Modelo B y la actual Raspberry Pi 3 Modelo B. Para la realización del proyecto se escogería en todo caso la Raspberry Pi 2. Las características de este modelo se muestran en la tabla: 2.5.

Tabla 2.5: Características Raspberry Pi 2

<b>Raspberry Pi 2</b>
Broadcom BCM2836
ARM11 ARMv7 ARM Cortex-A74 núcleos @ 900 MHz.
BroadcomVideoCore IV250 MHz. OpenGL ES 2.0
1 GB LPDDR2 SDRAM450 MHz.
USB x 4
HDMI 1.4 @ 1920x1200 píxeles
100 Mbit Ethernet
no Wi-Fi no Bluetooth
GPIO x 40

### 2.1.2. Arduino Uno Rev.3

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar [6]. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquiera interesado en crear entornos u objetos interactivos. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador, si bien tienen la posibilidad de hacerlo y comunicar con diferentes tipos de software (p.ej. Flash, Processing, MaxMSP). Las placas pueden ser hechas a mano o compradas montadas de fábrica; el software puede ser descargado de forma gratuita. Los ficheros de diseño de referencia (CAD) están disponibles bajo una licencia abierta. Existen multitud de tarjetas Arduino, cada una con unas características determinadas que las hacen idóneas para una aplicación u otra. En este proyecto, se ha empleado probablemente la tarjeta más genérica, Arduino UNO Rev3. (Ver Fig. 2.6)

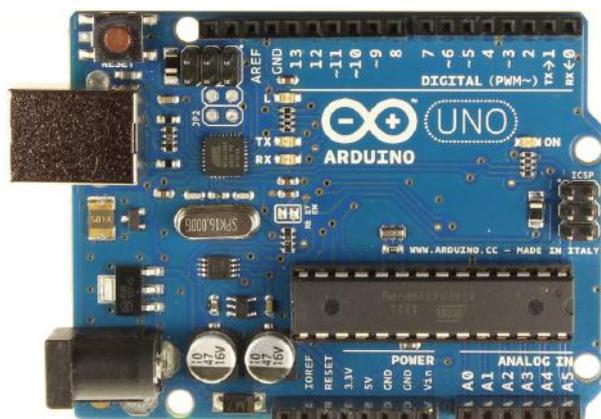


Figura 2.6: Arduino Uno Rev.3

Arduino UNO es una placa basada en el microcontrolador ATmega328. Principalmente dispone de 14 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM (*pulse-with modulation*), 6 salidas analógicas, un reloj de 16MHz y un puerto USB. La placa dispone de todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador, por lo que su uso resulta tremendamente sencillo. Otra funcionalidad interesante que llevó a su uso, es que aunque la tarjeta funcione por puerto serial, realmente lo emula desde un puerto USB, por lo que se puede manejar desde cualquier portátil. No es necesario el uso de grandes torres con puerto serial. Las características de

Arduino se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Características Arduino Uno

<b>Microcontrolador</b>	ATmega328
<b>Voltaje de operación</b>	5V
<b>Tensión de entrada</b>	7-12V
<b>Límite tensión de entrada</b>	6-20V
<b>Pines digitales E/S</b>	14 (6 PWM)
<b>Pines analógicos entrada</b>	6
<b>Corriente pin E/S</b>	40mA
<b>Corriente pin 3.3V</b>	50mA
<b>Memoria flash</b>	32 KB (0.5KB bootloader)
<b>SRAM</b>	2KB
<b>EEPROM</b>	1KB
<b>Frecuencia de reloj</b>	16 MHz

Hay muchos otros microcontroladores y plataformas con microcontroladores disponibles para la computación física. Parallax Basic Stamp, BX-24 de Netmedia, Phidgets, Handyboard del MIT, y muchos otros ofrecen funcionalidades similares.

### 2.1.3. Controladores de los motores

Los encargados del control y movimiento de los motores son los controladores, sin ellos este proyecto carecería de sentido, por eso se van a estudiar las distintas posibilidades existentes en el mercado para poder obtener una variedad suficiente a la hora de seleccionarlos.

#### 2.1.3.1. Controlador DRV8825

El DRV8825 es un controlador fabricado por Pololu para motores paso a paso con un microstepping de hasta 1/32, que le da al movimiento de los motores bipolares paso a paso una gran finura, puede entregar hasta un máximo teórico de 2.2A por fase con ventilación forzada de aire o 1.5A sin ventilación ni disipadores por tanto aumenta la potencia de estos. Estos controladores se regulan mediante un pequeño potenciómetro que tienen en uno de sus extremos. Si se gira en sentido horario se aumenta la potencia y en sentido antihorario se disminuye. (Ver Fig. 2.7)

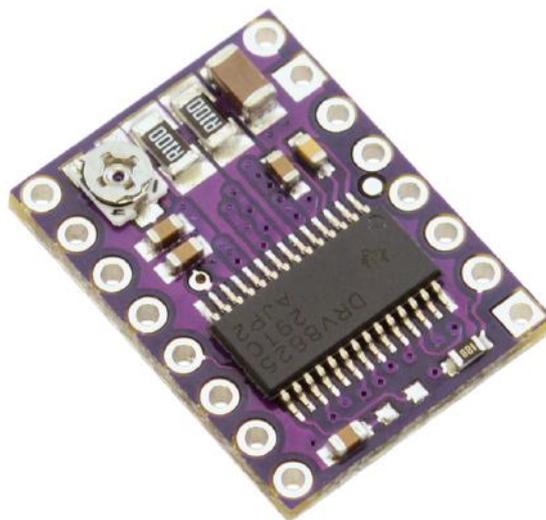


Figura 2.7: Controlador Pololu DRV8825

Características principales del DRV8825:

- Seis resoluciones de micro pasos diferentes: de paso completo hasta 1/32 micro pasos.
- Dispone de un regulador automático de tensión, que a efectos prácticos redundante en un funcionamiento más silencioso y con menos vibraciones.

- Control de corriente ajustable que le permite ajustar la salida de corriente máxima con un potenciómetro.
- Tensión de alimentación 45 V máximo.
- Circuito impreso de 4 capas.
- Protección contra cortocircuito y exceso de temperatura.

### 2.1.3.2. Controlador Bipolar TB6600

Es muy común encontrar en el mercado amplias posibilidades similares a estos controladores con un precio que varía en cuanto a la calidad de los componentes y especificaciones técnicas. El modelo incluido en la figura 2.8 es actualmente muy utilizado para la construcción de máquinas CNC caseras. Van protegidos con un encapsulado de aluminio que mejora en gran medida la disipación del calor que se pueda acumular además de protegerlo contra la suciedad y el polvo.



Figura 2.8: Controlador bipolar TB6600

Las características más relevantes de este controlador son las siguientes:

- Cinco resoluciones de micro pasos diferentes: de paso completo hasta 1/16 micro pasos.

- Control de corriente ajustable que le permite ajustar la salida de corriente máxima con un potenciómetro desde 0.2-5 A.
- Presentan un alto rendimiento y una buena relación calidad/precio.
- Tensión de alimentación 50 V máximo.
- Protección contra cortocircuito y exceso de temperatura.
- Temperatura de funcionamiento -10°C a 45°C; Temperatura de almacenamiento -40°C a 70°C.

### 2.1.3.3. Controlador AUDIX Technology

Los AUDIX Technology 6A 80V, son unos controladores fiables y de alto rendimiento que son capaces de suministrar una subdivisión de 200 pulsos por paso físico del motor. (Ver Fig. 2.9)



Figura 2.9: Controlador bipolar AUDIX Technology

Las características más relevantes de estos controladores son las siguientes:

- Bajo nivel de ruido, alta estabilidad.

- Alto rendimiento, bajo precio.
- 12/8 canales.
- Circuito de control especial.
- Alta frecuencia de respuesta: 200kpps.
- La corriente de fase del motor se reduce al 50% aproximadamente al recibir el último pulso.
- Corriente bipolar constante de interrupción.
- Entrada y salida con opto acopladores.
- La corriente conducida es ajustable desde 0.5A-6A/fase.
- Necesita fuente de alimentación individual, voltaje de 24V-80V CC.
- Subdivisión de 200 pasos.

Los pasos en los controladores se deben de ajustar mediante el selector que tiene en la parte superior.

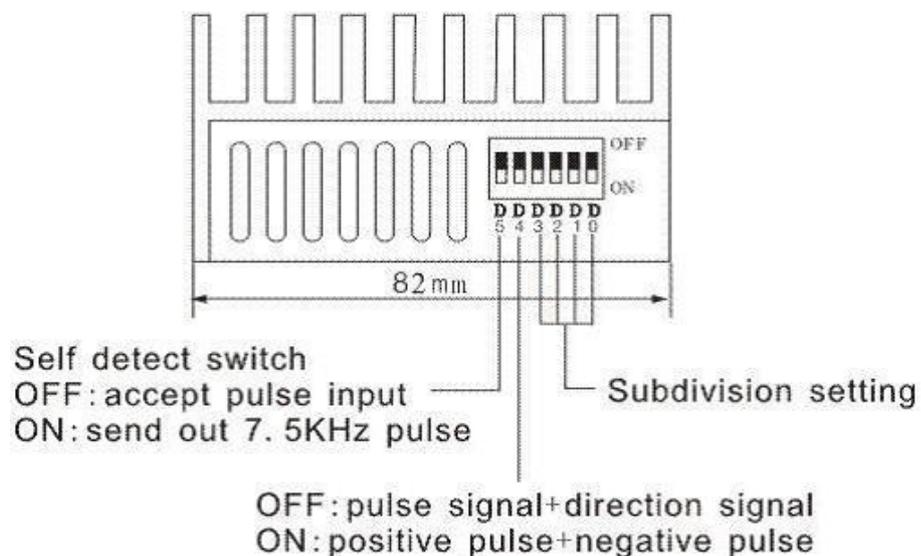


Figura 2.10: Ajuste de los pasos de los controladores AUDIX Technology

La máxima intensidad que puede ofrecer estos controladores a los motores es ajustable mediante un potenciómetro cuyo rango está definido entre 0.5-6A.

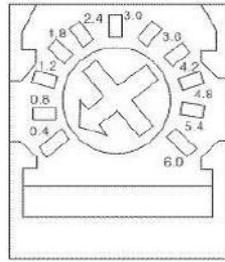


Figura 2.11: Ajuste de intensidad mediante potenciómetro de los controladores AUDIX Technology

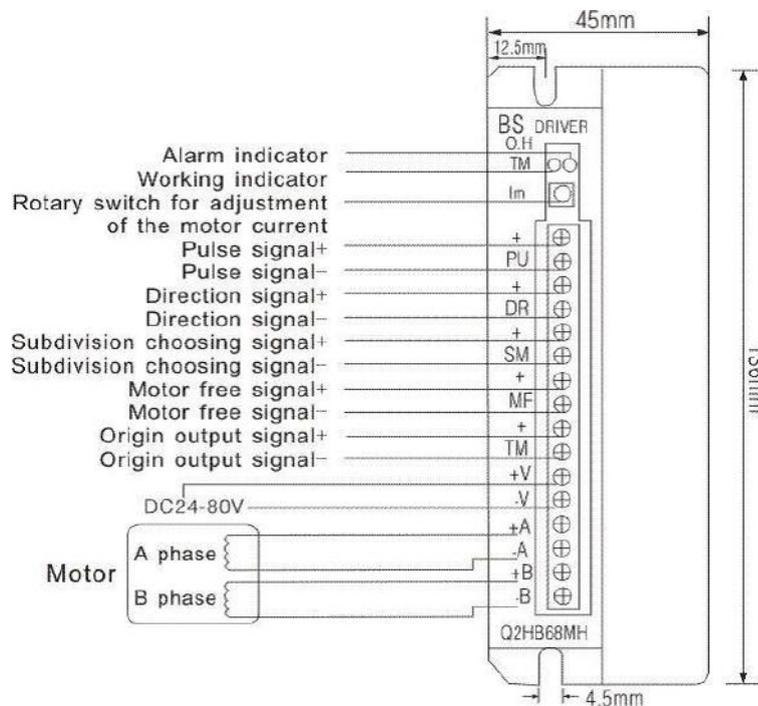


Figura 2.12: Esquema de conexión de los controladores AUDIX Technology

La peculiaridad de estos controladores es su rango de temperaturas de funcionamiento que alcanza una temperatura máxima de 70°C, la cual llegada a este extremo se encenderá la luz de alarma y se apagaran los controladores hasta bajar de los 50°C.

Tabla 2.7: Descripción de los terminales de conexión del controlador AUDIX Technology

<b>MARCA</b>	<b>FUNCIÓN</b>
<b>O.H</b>	Indicador de alarma
<b>TM</b>	Indicador de trabajo
<b>IM</b>	Potenciómetro ajuste intensidad del motor
+	Positivo de los opto acopladores, alimentados a 5V
<b>PU</b>	Entrada de tren de pulsos que provoca un giro de pasos sobre el motor (un paso por cada pulso)
+	Positivo de los opto acopladores, alimentados a 5V
<b>DR</b>	Dirección de sentido de giro del motor
+	Positivo de los opto acopladores, alimentados a 5V
<b>SM</b>	Realiza la subdivisión establecida por D0-D3
+	Positivo de los opto acopladores, alimentados a 5V
<b>MF</b>	Conectado + a la resistencia de limitación de corriente de la señal de salida, y conectarse a tierra TM. La corriente conducida, es de 50 mA y el voltaje conducido 50V
+	Positivo de los opto acopladores, alimentados a 5V
<b>+V/-V</b>	DC24-80V
<b>+A,-A</b> <b>+B,-B</b>	Corresponde con los terminales de conexión de las bobinas del motor, (A) una de las bobinas y (B) la otra

## 2.2. Firmware

El firmware es un programa que reside en la placa base del controlador y ejerce como enlace entre el software y el hardware. La configuración del firmware es única en cada caso. Se sabe de las propiedades de la máquina en cuestión como las dimensiones o configuración de velocidades o aceleraciones desempeña un papel importante en la calidad final del producto. A continuación se van a mencionar los dos firmwares más utilizados en la programación de las placas de Arduino como son Marlin y Grbl.

### 2.2.1. Grbl

Es un firmware de alto rendimiento y bajo coste basado para el control de las fresadoras CNC a través del puerto serie. Es libre y está disponible para ejecutarse en la plataforma Arduino Uno, cuya función es brindar la capacidad de interpretación de G-code a dicha placa.

El controlador está escrito en C altamente optimizado para lograr la sincronización exacta y la operación asíncrona. Es compatible con los estándares de G-code y ha sido totalmente comprobado con varias herramientas CAM sin problemas. Los arcos, círculos, movimientos helicoidales son totalmente compatibles al igual que todos los demás comandos principales del código G-code. Incluye una buena gestión de aceleraciones, lo que hace es buscar hasta 18 movimientos que se harán en un futuro y planificar sus velocidades para ofrecer una aceleración suave y sin tirones en las curvas.

Cabe mencionar que detrás de este gran firmware también hay una enorme comunidad apoyándolo y actualizándolo cada día, por lo que este firmware es una opción más que viable para poder utilizarlo en cualquier máquina CNC sin temor a quedar obsoleta y ausente de parches que corrijan cualquier fallo o acción no deseada que se pueda encontrar.

### 2.2.2. Marlin

Es un firmware libre para electrónica de un solo procesador *RepRap* que fue creado a partir de *Sprinter* (un firmware similar que quedó obsoleto) siendo hoy en día el firmware libre de mayor aplicación en impresoras 3D.

Le respalda una comunidad muy grande que lo somete a continuas actualizaciones cada mes. No es muy común utilizarlo para el manejo de fresadoras ya que no es tan completo como algunos firmwares de hoy en día, pero algunos softwares le dan soporte y puede mover nuestra máquina sin problema ninguno. No nos dejaría indiferentes si la comunidad de *RepRap* incorpora más utilidades para poder usarlo en fresadoras industriales algún día.

## 2.3. Software

Como se ha dicho, existen diversos softwares dedicados al control de las máquinas herramienta, cada uno de ellos con sus respectivas ventajas y desventajas. En este capítulo se expondrán los más relevantes, incluyendo tanto software comercial, como software libre, de este modo se podrá hacer una comparación más completa pudiendo ver si las soluciones libres pueden ser una opción más que suficiente respecto a las comerciales.

Para que nuestra máquina genere movimientos es necesario el uso de un software que sea capaz de mandar instrucciones a los controladores, estas instrucciones se mandan mediante G-code. G-code es el nombre de un lenguaje de descripción de operaciones para máquinas de control numérico por ordenador que puede ser usado también como lenguaje de programación para controlar estos dispositivos para simplificar operaciones utilizando, por ejemplo, bucles. Se almacena en formato texto, es decir, puede leerse (y modificarse) con un editor de texto plano. Los programas están estructurados en una sola columna que contiene las líneas de programa que se necesiten. Para no entrar mucho en detalles se va a establecer una lista con los comandos más comúnmente utilizados en los programas de G-code. (Ver tabla 2.8)

Tabla 2.8: Comandos más utilizados en la generación G-code

<b>G0</b>	Es un movimiento rápido de posicionamiento, donde la máquina se mueve a las coordenadas dadas sin hacer ningún mecanizado durante el traslado.
<b>G1</b>	Interpolación lineal, donde la velocidad del recorrido se establece fijamediante un comando propio. Este desplazamiento es el utilizado para el mecanizado.
<b>G2 y G3</b>	La máquina se movera generando un arco (G2 un arco a la derecha y G3 un arco a la izquierda).
<b>G54-59</b>	Posición de las coordenadas de trabajo.
<b>G90</b>	Modo de distancia absoluta.
<b>G92</b>	Modo de distancia incremental
<b>F</b>	Define la velocidad de desplazamientos.
<b>M0</b>	Pausa o final del programa.
<b>M3</b>	Encendido del motor de la fresadora en sentido horario.
<b>M4</b>	Encendido del motor de la fresadora en sentido antihorario.
<b>M5</b>	Detener el motor de la fresadora.
<b>M30</b>	Es el comando utilizado para acabar todos los programas.

### 2.3.1. Software comercial

#### 2.3.1.1. Mach3

Mach3 es un programa muy flexible diseñado para controlar máquinas como las fresadoras y máquinas de torneado. Es uno de los programas más utilizados para control de las máquinas herramienta de control numérico disponible como freeware o con soporte comercial. Funciona bajo Windows y permite utilizar hasta 6 ejes, convirtiendo un PC convencional en un controlador de la máquina CNC. Sus pantallas, botones y acciones son editables y personalizables lo que abre un sin fin de posibilidades (Ver Fig. 2.13). Las características de estas máquinas usadas por Mach3 son:

- Algunos controles de usuario. Un botón de parada de emergencia debe ser provisto a cada máquina.
- Dos o tres ejes que están en ángulo recto entre ellos (como X, Y y Z).
- Una herramienta con movimiento relativo a una pieza de trabajo. El origen de los ejes es fijado en relación con la pieza de trabajo.

Y opcionalmente:

- Algunos interruptores que dicen cuando la herramienta está en la posición de inicio "*Home*".
- Algunos interruptores que definen los límites de movimiento relativo permitido de la herramienta.
- Un husillo (*Spindle*) controlado. El husillo podría hacer girar la herramienta o la pieza de trabajo.
- Hasta tres ejes adicionales. Éstos pueden ser definidos como rotativo (e.g. su movimiento es medido en grados) o lineal. Uno de los ejes lineales adicionales puede ser puesto como esclavo de los ejes X o Y o Z. Los dos se moverán en conjunto todo el tiempo en respuesta a unos movimientos del programa pero ellos serán referenciados separadamente.
- Controles para el enfriador (líquido y/o niebla).
- Una sonda que permite la digitalización de una parte existente.
- Un interruptor o interruptores que enlazan los dispositivos de protección en la máquina.

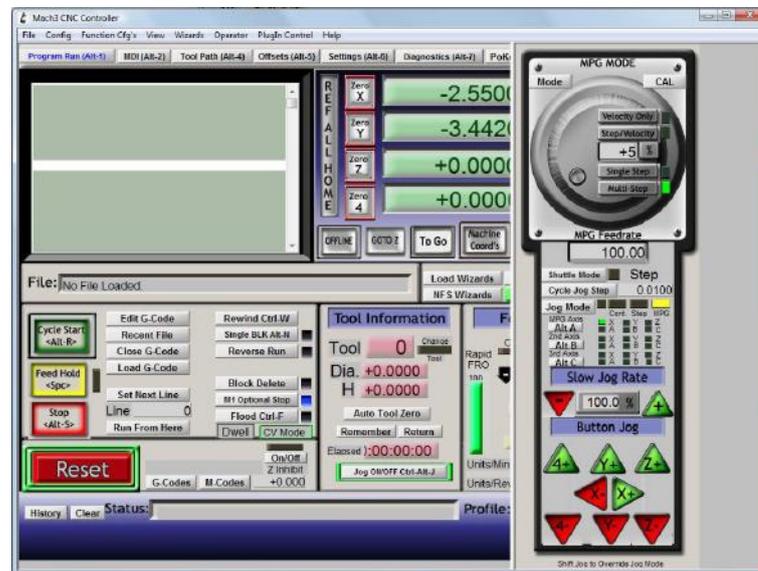


Figura 2.13: Interfaz gráfica Mach3

- Codificadores, como *"Linear glass scale"*, que puedan mostrar la posición de las partes de la máquina.

Aunque es un software muy completo una gran desventaja es que para la comunicación con una máquina de control numérico precisa de la conexión mediante el puerto paralelo. Hoy en día los ordenadores actuales no montan este puerto por lo que hay tres opciones, la de montar un viejo computador junto a la máquina que disponga de uno de estos puertos, adquirir una tarjeta PCI para dotar tu computador con puerto paralelo o usar el Mach3 estableciendo la conexión mediante el protocolo Modbus RS-232.

## 2.3.2. Software libre

### 2.3.2.1. TurboCNC

Otro software popular de control CNC disponible como shareware. Funciona bajo MSDOS lo que permite utilizarlo en PC's de muy escasa potencia. Maneja hasta 8 ejes y aunque su interfaz gráfica es muy sencilla tiene incondicionales adeptos por el control preciso de movimientos. (Ver Fig. 2.14)

### 2.3.2.2. LinuxCNC

Antes conocido como EMC2, es un sistema desarrollado en Linux en formato Live-CD2 para control en tiempo real de máquina herramienta. La

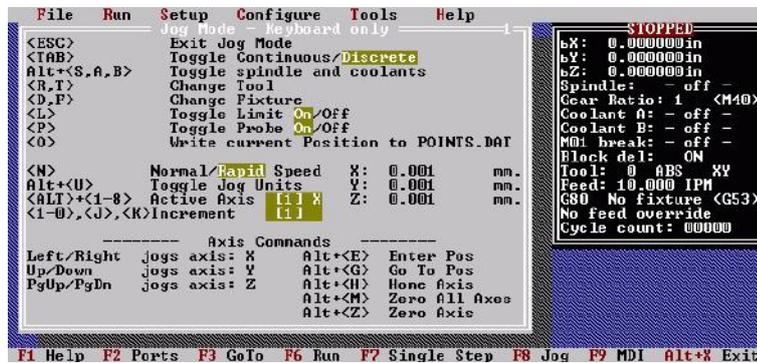


Figura 2.14: Interfaz gráfica TurboCNC

potencia de cálculo la gestiona el ordenador en el que esté instalado, LinuxCNC únicamente nos proporciona el software necesario para controlar nuestras máquinas a través del puerto paralelo. Quizá una de sus desventajas sea esa misma, ya que el puerto paralelo está prácticamente obsoleto y ya ningún ordenador moderno viene equipado con él. (Ver Fig. 2.15)

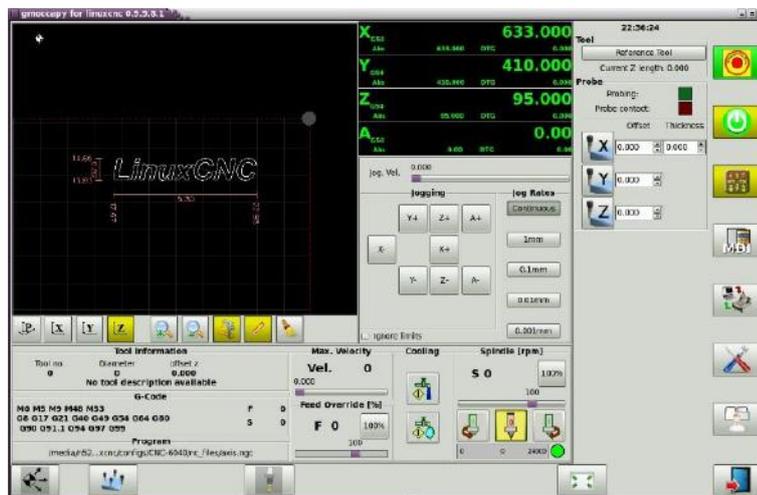


Figura 2.15: Interfaz gráfica LinuxCNC

Si la utilización del puerto paralelo no es un problema, puede conectarse a LinuxCNC cualquier máquina de entre 3 y 9 ejes y dispone de una librería abierta de controladores donde puede manejar desde motores paso a paso hasta servomotores por PWM. Otro punto fuerte de LinuxCNC son los diferentes entornos gráficos que trae para controlar las máquinas. En total dispone de seis entornos gráficos: *Axis*, *Ngc*, *Touchy*, *Tklinuxcnc*, *Mini* y *Keystick*. Al ser un software libre cuenta con una comunidad que colabora en

su desarrollo y mantenimiento. El diseño de arquitectura abierta le permite no estar "focalizado" como programa de fresado, sino que es un controlador de motores y trayectorias que puede manejar elementos robóticos a través de G-code (incluso con ejes no Cartesianos como brazos robot).

### 2.3.2.3. Grbl controller

Grbl controller es un software que está diseñado para enviar G-code a las máquinas herramienta de control numérico, como las fresadoras 3D. Este software es muy simple de usar gracias a simplicidad y a la interfaz gráfica tan intuitiva que trae. Grbl controlador está escrito utilizando las bibliotecas multiplataforma Qt. También recibe ayuda de la QextSerialPort biblioteca para simplificar la elección del puerto serie USB.

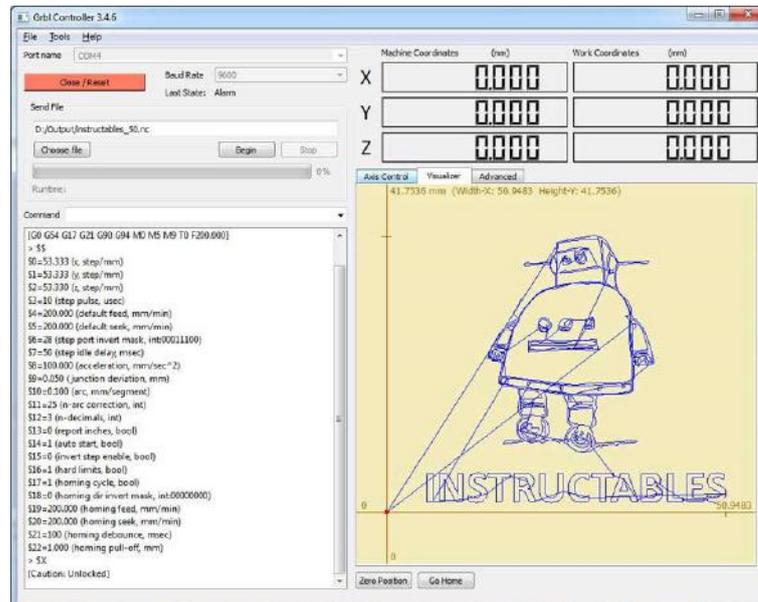


Figura 2.16: Interfaz gráfica Grbl Controller

### 2.3.2.4. Universal G-code sender

Software libre multiplataforma diseñado para trabajar bajo Grbl, sencillo de usar y con las herramientas básicas de una máquina herramienta de control numérico. Como indica su nombre, Universal G-code Sender permite el control de las máquinas CNC enviando línea por línea el programa G-code al Arduino. (Ver Fig. 2.17)

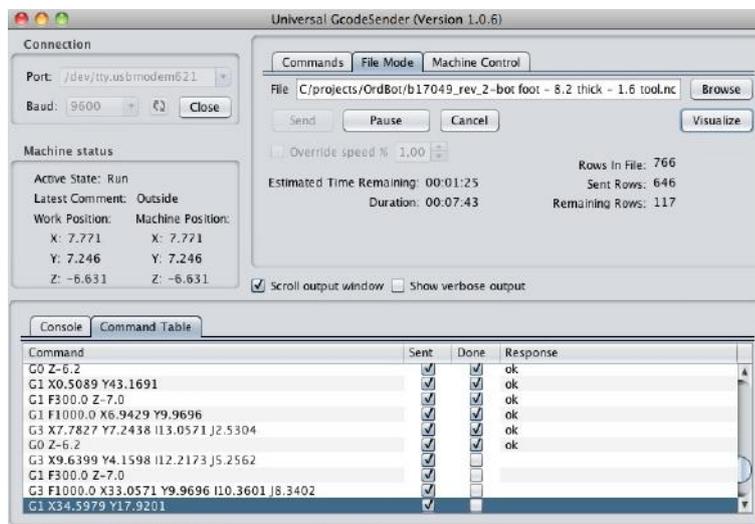


Figura 2.17: Interfaz gráfica de Universal G-code sender

### 2.3.2.5. bCNC

bCNC es un software capaz de enviar comandos Grbl, realizar la localización de la pieza y editar el G-code. bCNC es multiplataforma y esta escrito en Python. Es un software bastante robusto y muy rápido, capaz de trabajar con un hardware antiguo o lento como puede ser el caso de la Raspberry Pi. (Ver Fig. 2.18)

Entre sus muchas características se encuentran las siguientes:

- Interfaz sencilla e intuitiva para las pequeñas pantallas.
- Importación / exportación de G-code y archivos DXF.
- Funciona muy bien en hardware antiguo.
- La configuración del espacio de trabajo (comandos G54..G59)
- Botones configurables por el usuario
- Amplias herramientas y opciones para realizar un sondeo en la pieza.
- Varias herramientas, como bases de datos configurable de materiales, fresas, acciones,...,características básicas de CAM (composición de perfil, corte, vaciado, taladro), puede usar plugins de G-code.
- Tiene la posibilidad de enlazarlo vía Web para manejarlo a través de teléfonos inteligentes.

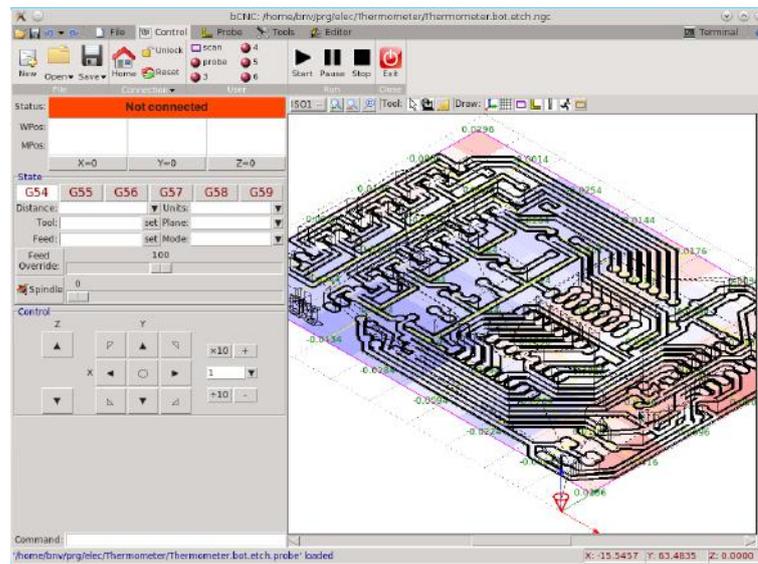


Figura 2.18: Interfaz gráfica bCNC

- Editor de G-code y visualización.

## 2.4. Clasificación de los motores

Las máquinas de control numérico realizan los desplazamientos de la herramienta a través de los motores mediante la conversión de las instrucciones generadas por el controlador en acciones. En este apartado se hablará sobre los tipos de motores que se utilizan hoy en día en la industria y que son implantados en las máquinas de control numérico.

### 2.4.1. Motores de continua, alterna y servomotores

Existen varios tipos de motores eléctricos, cada uno con propiedades distintas.

Los más comunes, son los motores de CC (corriente continua). En este tipo en particular, se puede controlar la velocidad variando el voltaje en un cierto rango; con una curva apropiada de voltaje se puede parcialmente controlar su aceleración, pero no su posición y menos aún su torque. (Ver Fig. 2.19)

Otro tipo de motor muy difundido es el motor de CA (corriente alterna) que puede variar su torque en base al voltaje suministrado dentro de un

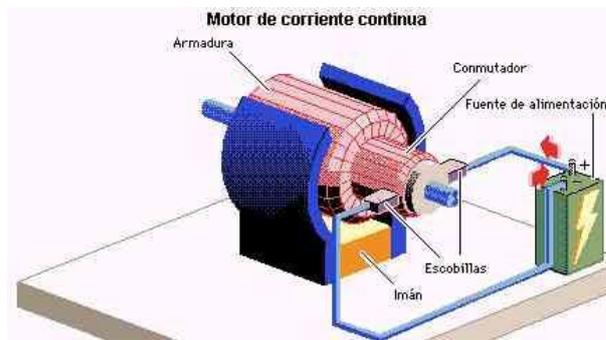


Figura 2.19: Motor de corriente continua

pequeño rango, y puede variar su velocidad en base al cambio de frecuencia de CA que se le suministra. Sin embargo no se puede controlar su posición. (Ver Fig. 2.20)

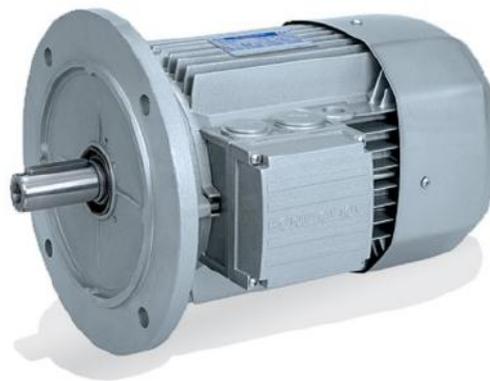


Figura 2.20: Motor de corriente alterna

‘Estos motores anteriormente vistos requieren de dispositivos que informen al circuito del posicionamiento del rotor. Esto eleva el coste del sistema, aspecto que reduce el uso para este ámbito.’

Por ultimo están los servomotores, es la opción más profesional, se usan motores de construcción convencional de escobillas (mejor de 4 escobillas) o la tendencia actual, brushless con control de posición. Habitualmente trabajan acoplados a una reductora de precisión e incluyen un sensor de posicionamiento para gestionar la posición. Para completar el sistema una controladora específica que trabaja en lazo cerrado coordina la velocidad y aceleración del motor, así como el error de posición. Los torques y sobretodo las velocidades alcanzadas son muy superiores a los motores paso a paso, pero por

el contrario su coste también es bastante elevado, reduciendo así su difusión. (Ver Fig. 2.21)



Figura 2.21: Servomotor

La interfaz eléctrica de la controladora es muy similar a los PaP (Pulso/Dir o CW/CCW), así pues la elección de estos motores es en primera instancia una cuestión económica, a cambio la suavidad de movimiento y la garantía de que no se "pierden pasos" pues la electrónica detecta las diferencias de posición y lo corrige o indica el error.

#### 2.4.2. Motores paso a paso (PaP)

El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control. Son motores que gracias a su precio y su baja complejidad se utiliza cada vez más, principalmente para la construcción de máquinas de control numérico caseras. No hay que ser un especialista para el uso de estos motores ya que se pueden controlar fácilmente y no necesitan de un circuito cerrado. (Ver Fig. 2.22)

Entre sus principales ventajas se encuentran:

- El ángulo de rotación es proporcional a los pulsos de entrada.
- Exactitud en la posición y repetición de movimientos.
- Los motores paso a paso tienen un error de 3 a 5% del paso y dicho error no es acumulativo de un paso a otro.



Figura 2.22: Motor paso a paso

- Excelente respuesta ante el arranque, parada y reserva.
- Más fiable, ya que al carecer de escobillas se alarga su vida útil y no genera chispas, un factor a tener en cuenta por el que puede trabajar en entornos inflamables.
- Permite un control en lazo abierto, ya que el motor responde a pulsos de entrada digitales.
- Su velocidad de rotación no depende de la carga acoplada a su rotor.

Como desventajas se pueden añadir que el motor paso a paso suele tener una menor eficiencia que los motores de continua o servomotores. También es propenso a la resonancia y el movimiento suave a menudo requiere microstepping. Las cargas no aceleran rápidamente debido al bajo par a par de inercia. A pesar de su fuerte ruido y sobrecalentamiento en alto rendimiento, los motores paso a paso tienen una salida de potencia baja en general por su peso y tamaño.

### 2.4.3. Tipo de motores paso a paso

Hay que diferenciar tres tipos de motores paso a paso en base a su construcción: el motor de reluctancia variable, el motor de magnetización permanente y el motor híbrido.

- Los de reluctancia variable, su rotor está fabricado por un cilindro de hierro dentado y el estátor está formado por bobinas. Este motor tiene la característica de trabajar a mayor velocidad que los de imán permanente.

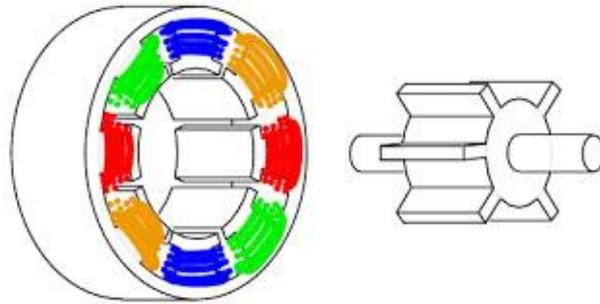


Figura 2.23: Rotor y estátor de un motor PAP de reluctancia variable

- Los motores de imán permanente, su rotor es un imán que posee una ranura en toda su longitud y el estátor está formado por una serie de bobinas enrolladas alrededor del núcleo o polo. Dependiendo de la construcción del motor, es típicamente posible obtener pasos angulares de 7.5, 11.25, 15, 18, 45 o 90°. El ángulo de rotación se determina por el número de polos en el estátor.



Figura 2.24: Rotor y estátor de un motor PAP de imanes permanentes

- Por último, los motores de pasos híbridos, serían una combinación de los anteriores. Se caracteriza por tener varios dientes en el estátor y en el rotor, el rotor con un imán concéntrico magnetizado axialmente alrededor de su eje. Con este tipo de motor se consigue un alto rendimiento y buena velocidad, tiene alta precisión y alto par y se puede configurar para suministrar un paso angular tan pequeño como 1.8°.

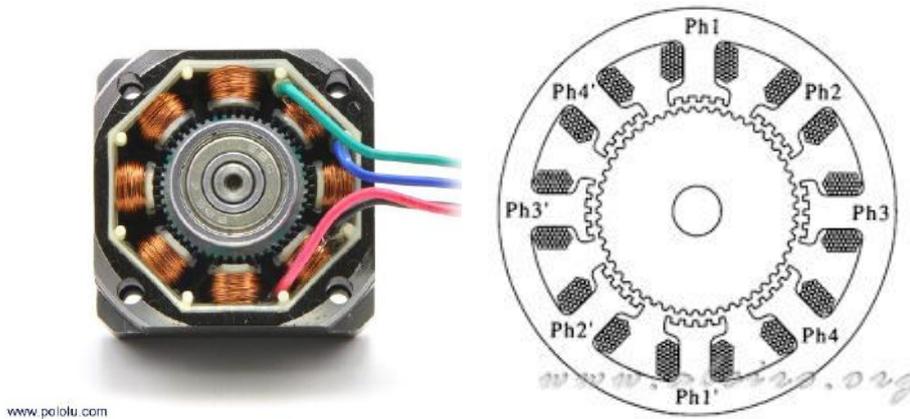


Figura 2.25: Rotor y estator de un motor PAP híbrido, detalle de los dientes

#### 2.4.4. Configuración de las bobinas del motor PaP

Hoy en día casi todos los motores PaP son de construcción híbrida [9]. Pero donde si hay diferencia es en la forma de conectar sus bobinados. Cada opción tiene sus ventajas e inconvenientes que se verán en los siguientes apartados.

##### 1. MOTORES UNIPOLARES.

a y se aplica corriente siempre en el mismo sentido a cada bobinado. Su ventaja es la velocidad al no tener que alternar magnetizado a las bobinas. Por el contrario se desaprovecha la mitad del bobinado y el torque es mucho menor. Es una configuración que se suele usar en motores de disco duro o impresoras donde el torque no importa que sea pequeño.

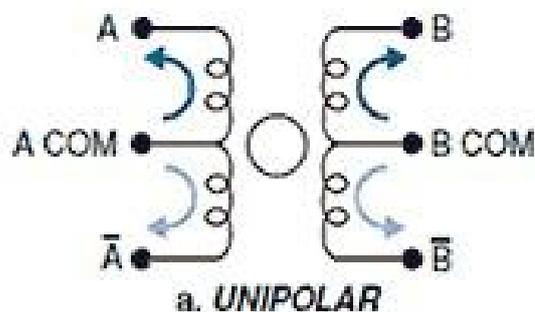


Figura 2.26: Configuración unipolar de las bobinas del estator

## 2. MOTORES BIPOLARES.

Estos tienen generalmente 4 cables de salida. Necesitan ciertos trucos para ser controlados debido a que requieren del cambio de dirección de flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. Entre los motores bipolares hay dos configuraciones: Bipolar Serie y Bipolar Paralelo.

- **Bipolar Serie:** suele ser una opción más usada con un compromiso de características. Cualquier motor unipolar puede usarse como bipolar simplemente no usando la toma intermedia (o en su construcción si solo tiene 4 cables). Requieren de un consumo medio, su torque es mayor que el unipolar (¡40%) pero la inductancia es más elevada por lo que su velocidad máxima queda reducida.

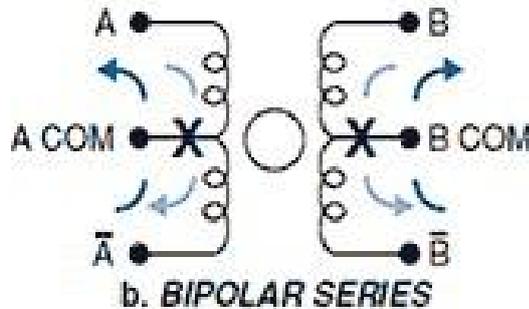


Figura 2.27: Configuración bipolar-serie de las bobinas del estator

- **Bipolar Paralelo:** requiere que el motor ofrezca 8 cables o que directamente este construido de tal forma que estén conectadas las bobinas en paralelo en su interior y ofrezca únicamente 4 cables como resultado. La inductancia es mucho menor que en serie y alcanzan un 30% más de velocidad, por inconveniente hay que destacar que su consumo es el doble.

En conclusión puede sacarse de esta información que disponen de unos motores paso a paso bipolares, ya sean en serie o en paralelo.

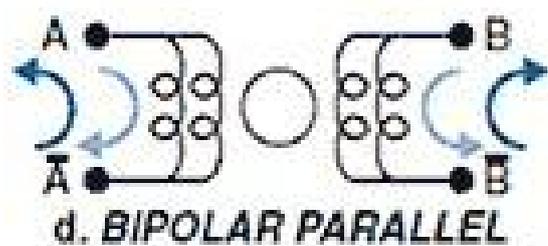


Figura 2.28: Configuración bipolar-paralelo de las bobinas del estator



# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se va a desarrollar un estudio de la fresadora donada por NAVANTIA S.A. a la Universidad Politécnica de Cartagena, tratando de analizar tanto su estructura mecánica como todos los componentes activos y pasivos que la conforman, de tal manera que se recoja la información necesaria para tratar de llevar el proyecto a término aprovechando todos los máximos componentes de ésta, ya que algunos de ellos como los motores paso a paso, no tienen ninguna referencia ni manual que puedan facilitarnos dicha tarea.

### 3.1. Análisis mecánico

El análisis mecánico en este punto de la memoria abarcará toda descripción de la estructura de nuestra fresadora incluyendo los sistemas de desplazamiento de la que está dotada la misma, dejando al margen cualquier tipo de elementos que dependan de algún tipo de excitación externa para su funcionamiento. Para poder empezar el análisis de la fresadora es necesario conocer sus partes principales antes de entrar en materia más adelante. En la figura 3.1 se pueden ver los principales componentes mecánicos de la fresadora.

Esta máquina herramienta está clasificada en el grupo de fresadoras verticales de bancada móvil, en las que el eje está orientado verticalmente, perpendicular a la mesa, contando con la posibilidad de realizar un pequeño desplazamiento de tipo axial, ideal para facilitar el mecanizado en escala. Al ser de banca móvil permite el movimiento de los ejes X e Y, quedando fijo el eje Z y solo pudiendo desplazarse en vertical. La fresadora vertical se caracteriza por tener similitud con las máquinas perfiladoras o vaciadoras en su forma de operar, y a las máquinas taladradoras por su cabezal. También

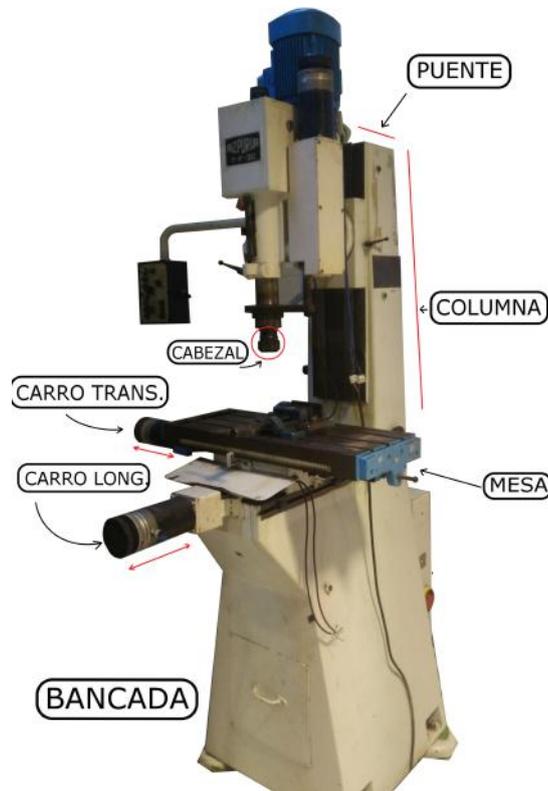


Figura 3.1: Principales componentes mecánicos de la fresadora Aizpurua T-30-CNC

está indicada para realizar cortes o agujeros a distancias medidas gracias a su gran precisión y al ajuste micrométrico de la mesa. En esta fresadora no es la mesa la que realiza el desplazamiento vertical, sino que este movimiento, es realizado por todo el cabezal de la fresadora que se aproxima y se aleja de la mesa durante todo el tiempo que dure el trabajo. Tiene un motor encargado de realizar recorridos largos a lo largo de la columna para hacer una aproximación a la mesa de trabajo, y otro movimiento vertical que es realizado por un husillo que mueve solo el cabezal de la herramienta aportando la mayor precisión a la hora de realizar piezas complejas (Ver Fig.3.2). La estructura de la fresadora está realizada en acero de fundición, lo cual la dota de una robustez y peso que redundan en su estabilidad y rigidez.



Figura 3.2: Tipos de desplazamiento sobre el eje Z

### 3.1.1. Número de ejes

Lo que limita las posibilidades de movimiento de una máquina herramienta es el número de ejes de la misma, existiendo una relación directa entre el número de ejes y los grados de libertad. Las máquinas CNC suelen tener 3 ejes primordiales, en el caso de tener más, serán ejes complementarios. Sabiendo esto se pueden clasificar cantidad de fresadoras según el número de ejes. La fresadora está dotada con tres ejes, por lo que se caracteriza porque su capacidad de mecanizado se orienta a través de los tres planos del eje cartesiano. Con estos ejes se nos brinda la posibilidad de movimiento horizontal, vertical y oblicuo. Permiten un control sobre el movimiento relativo existente entre la máquina herramienta y la pieza. Los movimientos que permite esta configuración son los siguientes:

- El movimiento longitudinal se realiza según el eje X, el cual es horizontal y paralelo a la superficie de sujeción de la pieza y corresponde al movimiento de trabajo.
- El movimiento transversal se realiza sobre el eje Y. Forma un triedro de sentido directo con los ejes X y Z. Se asocia con el desplazamiento

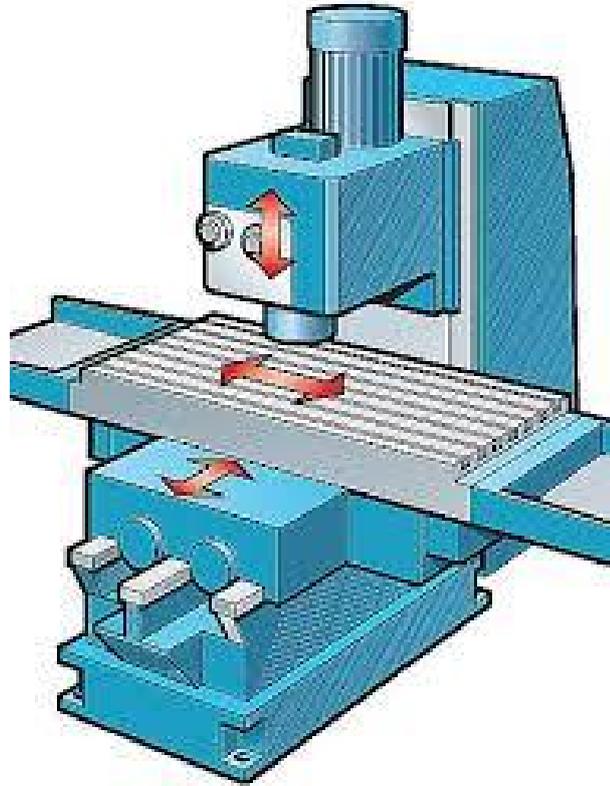


Figura 3.3: Movimientos básicos de una fresadora de tres ejes

transversal de la mesa de trabajo, realizado en el plano horizontal.

- El movimiento vertical se realiza a lo largo del eje Z, que corresponde al movimiento vertical de la herramienta respecto a la mesa de trabajo. Con este movimiento se establece la profundidad de corte del fresado.
- Pueden tener un movimiento axial en el cabezal para acomodar la herramienta y el cabezal y realizar otro tipo de cortes angulares. (Ver Fig. 3.4)



Figura 3.4: Articulación para la orientación angular del cabezal

### 3.1.2. Transmisión del movimiento

El sistema de transmisión es el encargado de generar las translaciones rectilíneas de movimiento, estas translaciones comienzan desde el motor paso a paso. El recorrido de la herramienta de corte es la combinación del desplazamiento de cada eje de movimiento por separado. El elemento primordial, causante del movimiento de cada uno de los ejes de las máquinas herramienta de control numérico, son los husillos por recirculación de bolas. Estos se basan en un mecanismo tuerca husillo, que convierte el movimiento de rotación en movimiento lineal. En estos husillos, las bolas, se encuentran contenidas en el interior de la tuerca en un conducto helicoidal, por el que al realizar movimientos de rotación van recirculando debido a su geometría y aumentando así la vida útil de las mismas. Su objetivo es reducir aún más la fricción y el rozamiento que existe entre el husillo y la tuerca al desplazarse.

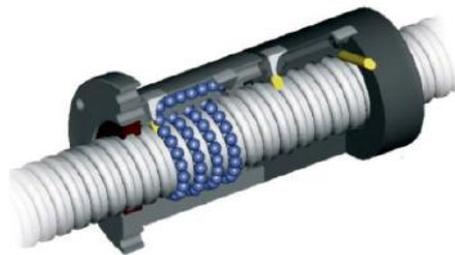


Figura 3.5: Husillo de bolas

Las ventajas de este tipo de husillos son que permiten trabajos de larga duración con altas velocidades de desplazamiento, manteniendo una excelente precisión con unas cargas elevadas y baja fricción. Al tener las bolas mayor vida útil se requiere un menor mantenimiento de los husillos.



Figura 3.6: Husillo de bolas del eje X de la fresadora Aizpurua T-30-CNC

La diferencia de la eficiencia de los husillos de bolas respecto a unos husillos convencionales tuerca-husillo es del 40 % aproximadamente.

### 3.1.3. Caja de velocidades

Actualmente todas las máquinas herramienta de control numérico llevan integrado un variador de velocidad, que regula las revoluciones por minuto (rpm) con la que gira la fresa de manera automática según el tipo de operación de corte que se vaya a realizar en cada momento. Ésta fresadora en su lugar, tiene una caja de transmisión, que contiene engranajes que se acoplan para cambiar la relación de transmisión que se ajuste a las condiciones necesarias de trabajo. Esta caja de velocidades tiene dos palancas de dos posiciones, que realizan el cambio de posición interna de los engranajes, por tanto nos permite configurar hasta cuatro velocidades de trabajo.



Figura 3.7: Caja de transmisión de la fresadora Aizpurua T-30-CNC

#### 3.1.4. Sistema de refrigeración

En la base se puede diferenciar que la máquina tiene un depósito metálico donde se almacena el refrigerante, el cual mediante una bomba, es impulsado por unos conductos hacia la parte superior junto al cabezal para refrigerar finalmente la herramienta y el material que se está mecanizando. Este refrigerante es reutilizado mediante la canalización y retorno al depósito contenedor del mismo. Dispone de un codo hidráulico en la cara izquierda superior de la columna por el cual era expulsado el flujo de refrigerante y enfocado al espacio de trabajo, y en la mesa de trabajo hay una salida de retorno del refrigerante sobrante que conduce nuevamente al depósito contenedor.

#### 3.1.5. Canalización de los cables en la estructura

Cuando se habla de máquinas herramienta industriales, hay que hacer especial hincapié en cada detalle en cuanto a seguridad se trata. Una medida importante a tomar es la debida protección de los cables que salen de los

motores y finales de carrera y llegan al cuadro de control. En primer lugar, los cables deben de estar perfectamente aislados. Los conductores deben de estar dimensionados con la intensidad de corriente que hayan de soportar y los ciclos de trabajo. Los cables deben de estar protegidos contra daños ambientales y físicos, ya sea, choques mecánicos, desgaste por rozamiento y corrosión.

La fresadora a primera vista presenta los cables de los motores y los finales de carrera completamente cortados y sin ningún canal o tubo que los proteja y los conduzca a la caja de control. Cuando se realiza un análisis de la estructura de la fresadora se ha diferenciado en la base y en la columna unos orificios por donde antiguamente los cables, tanto de motores como de sensores, eran encauzados mediante tubos. En la figura 3.8 se muestran dichos orificios.

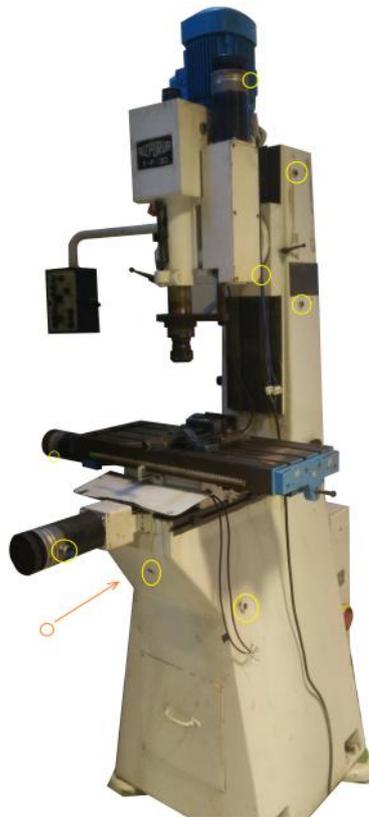


Figura 3.8: Orificios presentes en toda la estructura de la fresadora Aizpurua T-30-CNC

La flecha naranja de la anterior imagen indica que en la cara izquierda

de la base hay un agujero de canalización. Habiendo visto cada uno de estos orificios y según la posición de cada elemento cableado que hacía uso de éstos, se ha representado en la figura 3.9 un esquema de forma lógica y ordenada donde se marca el orificio con el/los correspondientes cables de motores y sensores que serán conducidos por su interior.

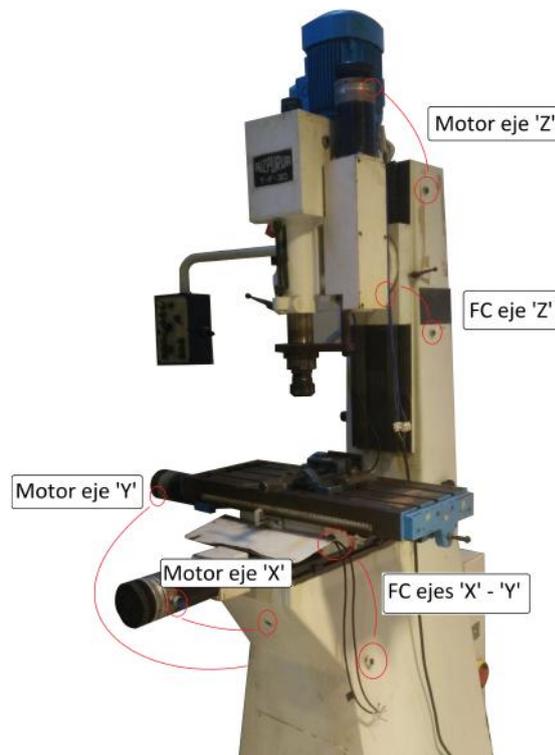


Figura 3.9: Esquema de unión de los orificios

Los cables pasarán a través de los tubos al interior de la estructura, donde serán recogidos mediante gusanillos y encauzados hasta llegar al panel de control pasando antes por el cuadro eléctrico.

Como son conocidas todas las condiciones ambientales en las que se va a encontrar a diario la fresadora, el tubo que se empleará para proteger los cables debe de estar reforzado a la vez de ser flexible, para que permita los libres movimientos que realizarán los ejes cuando la máquina herramienta esté en movimiento. La opción adoptada en este proyecto es utilizar tubo flexible de PVC reforzado. (Ver Fig. 3.10)



Figura 3.10: Tubo flexible de PVC reforzado

La medida que será necesaria a emplear para cada sección será tomada de tal forma que para los ejes fijos, donde la distancia entre ambas superficies de entubación no se vea afectada por el movimiento de la máquina, el tubo una vez colocado debe presentar un pequeño pandeo, y para los ejes que afecten a la distancia entre orificios de entubación, se llevaran a la distancia máxima permitida y se aplicara el mismo criterio, con tal que los cables no estén tensos en el interior del tubo en ningún momento. Para unir estos tubos tanto a la estructura como con los motores antiguamente la fresadora utilizaba unas tuercas con una rosca especial de paso pequeño (1mm). Muchas de las tuercas han desaparecido y las que aún se conservan están deterioradas. (Ver Fig. 3.11)



Figura 3.11: Tuerca de unión entre el tubo y el motor

Por otro lado para unir los tubos a la estructura la fresadora precisa de una pieza más a parte de la tuerca que anteriormente ha sido mencionada, ésta pieza es un tornillo hueco que se adapta por un lado al diámetro del orificio de la estructura y por otro al diámetro de la tuerca del tubo. (Ver Fig. 3.12)



Figura 3.12: Pieza que acopla el tubo a la estructura

La solución a la falta de varias tuercas de acople y uno de estos tornillos huecos ha sido diseñar mediante SolidWorks nuestra propia pieza [8]. Estos diseños serán impresos en ABS mediante una máquina 3D con tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) que se encuentra en el Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación. La impresora empleada para la fabricación de todos estos modelos 3D es la LemonBot fabricada por LemonMaker (Ver Fig. 3.13).



Figura 3.13: Impresora 3D LemonBot

Los planos de todas las piezas diseñadas estarán especificados en los ANEXOS del proyecto. Se ha tenido en cuenta que la resistencia que ofrece el ABS con respecto a una pieza fabricada en cualquier aleación es muy significativa, por lo que, se ha tendido a aumentar el grosor de la pieza del diseño en consecuencia. El tipo de rosca que se ha empleado en este caso es una rosca métrica de diámetro 16mm y 1mm de paso. Una vez impresa la pieza solo queda ir al taller de mecanizado y comprobar que encaja perfectamente donde corresponde. Es importante cerciorarse que no tenga ningún tipo de holgura y quede bien apretada la rosca. En la figura 3.14 se muestra el diseño realizado y la impresión de dicha tuerca.

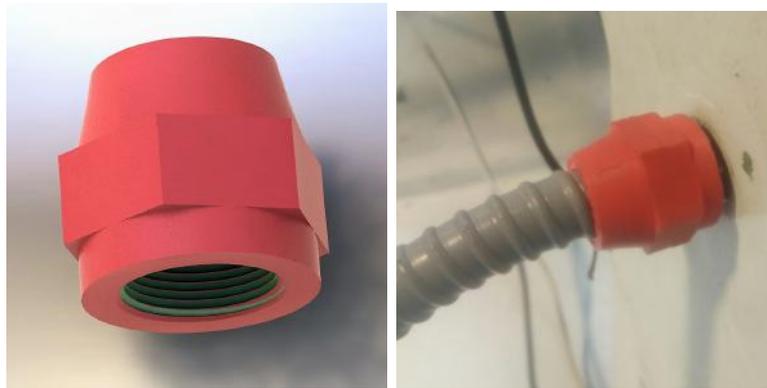


Figura 3.14: A la izquierda modelo 3D de la rosca renderizado, a la derecha modelo impreso

Ahora toca plantearse el diseño del tornillo hueco para uno de los orificios de la estructura que no lo tiene. Este diseño no puede ser totalmente igual ya que roscar ABS en un material metálico es una unión de fuerza porque el ABS se acaba amoldando al perfil de la rosca, pero hacer dos piezas de plástico teniendo en cuenta los límites dimensionales máximos permitidos, y que las roscas pueden sufrir desgaste con el tiempo, se ha optado por una unión de presión. La métrica del tornillo hueco es de paso 1.5mm y el diámetro de la rosca es 12.20mm. (Ver Fig. 3.15)

El resultado final del montaje en la fresadora de los conductos con los diseños de las tuercas incluidos se pueden apreciar bien en la figura 3.16. En la parte superior se encuentran los tubos por los que se conducen los cables de el motor del eje Z (tubo superior) y el cableado del final de carrera del mismo eje. Por otro lado, en la parte inferior se encuentran los tubos que conducen los terminales del motor del eje Y y el cableado de los

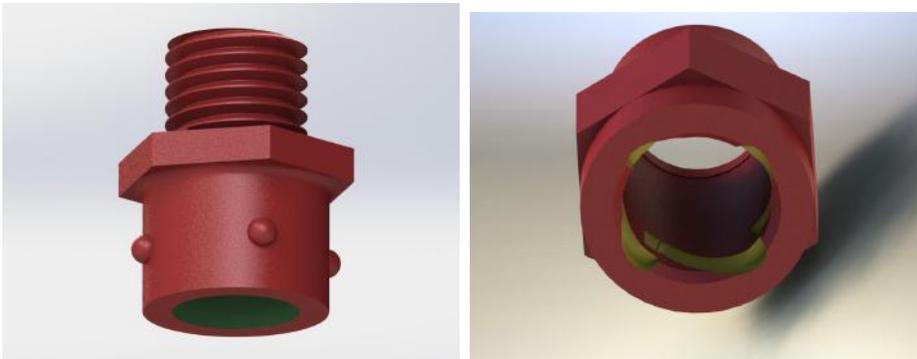


Figura 3.15: Modelo tornillo y tuerca que son unidos a presión

finales de carrera de los ejes X e Y. El tubo que conduce el cableado del motor del eje X se encuentra oculto en la foto por la base de la fresadora.

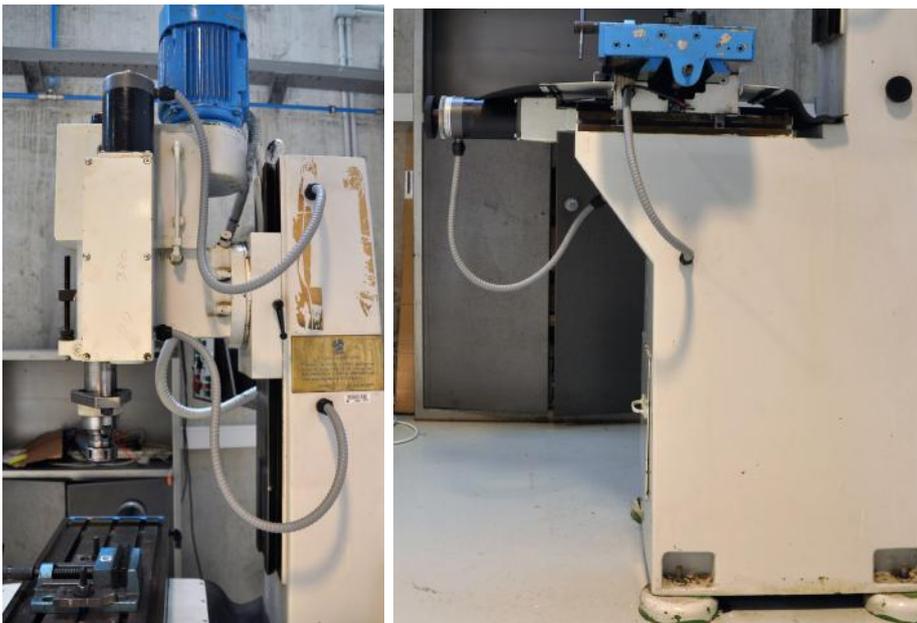


Figura 3.16: Canalización parte superior a la izquierda, y parte inferior a la derecha

## 3.2. Análisis eléctrico

Este apartado se dejará definido el sistema eléctrico que aún conserva la fresadora de control numérico. Se verán los componentes pasivos y activos como pueden ser finales de carrera, identificación de los motores y panel de control de usuario.

### 3.2.1. Finales de carrera

Dentro de los componentes electrónicos se encuentran los finales de carrera o sensor de contacto (conocido como sensor de límite), son dispositivos eléctricos, neumáticos o mecánicos situados al final del recorrido o de un elemento móvil, en nuestro caso están situados en cada uno de los ejes de nuestra máquina CNC, y tienen el objetivo de enviar señales al controlador para definir el área de trabajo de la misma a su vez que limita el recorrido de los ejes. El movimiento mecánico en forma de leva o empujador actúa sobre la palanca o pistón de accionamiento del interruptor de posición haciendo abrir o cerrar un contacto eléctrico del interruptor.

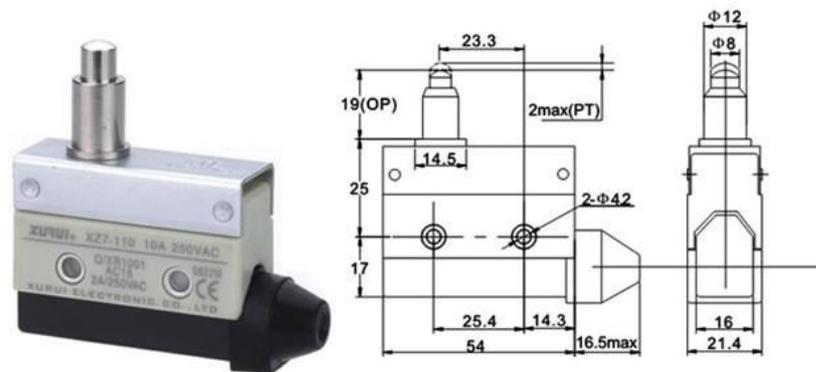


Figura 3.17: Final de carrera mecánico con pistón

Estos sensores tienen dos tipos de funcionamiento: normalmente abierto (NO) y normalmente cerrado (NC). Cuando se utilizan sensores mecánicos, sobre todo para máquinas de este tipo, es mejor utilizar la configuración (NC) ya que si en algún momento de su vida útil el sensor se rompiera, la máquina detectaría el cambio de estado en la entrada, permitiéndonos reemplazar este por otro en su lugar.

Entre las ventajas se encuentran la facilidad en la instalación, la robustez del sistema, pueden trabajar a tensiones altas, son inmunes a la electricidad estática. Los inconvenientes también están presentes como la velocidad de detección y uno de ellos más comunes que es la posibilidad de rebotes en el contacto. Esta máquina herramienta de control numérico cuenta con tres finales de carrera mecánicos con pistón, uno situado en cada eje. Ya que la fresadora ha estado trabajando durante 18 años antes de ser cedida a la Universidad, uno de los primeros pasos a tener en cuenta es cerciorarse que los finales de carrera actualmente montados estén en buen estado. Para realizar las pruebas adecuadamente se precisará de un multímetro configurado para medir continuidad, y de los tres terminales del sensor habrá que localizar cuál de ellos es el común y marcarlo para diferenciarlo de los otros dos terminales. Para comprobar que funciona correctamente se colocan las pinzas del multímetro en los extremos de dos terminales, uno de ellos debe ser el común, de modo que deberá de marcar continuidad sin pulsar el pistón si se mide en el terminal NC. El terminal sobrante del final de carrera corresponderá a la configuración NO, que marcara continuidad en caso que se pulse el pistón o leva del sensor.

A continuación se mostrarán las posiciones que ocupan estos sensores montados en los ejes de la fresadora:

- Los terminales tanto del final de carrera del eje X y del eje Y son conducidos hasta salir por un orificio común. Los cables de los mismos fueron cortados dejando el cable justo para poder trabajar con ellos, que aunque lo ideal sería cablearlos totalmente de nuevo, no se puede debido a que el aislante que protege a los cables se ha endurecido con el paso de los años. Por esto se ha optado por sanear los terminales y establecer la extensión necesaria de cable que nos permita llegar a la caja de control.



Figura 3.18: Final de carrera del eje X

- En el eje Z el final de carrera está en buen estado al igual que el eje X y por eso se reutilizará este sensor mecánico de pistón saneando sus terminales y prolongándole el cable hasta la distancia deseada.



Figura 3.19: Final de carrera del eje Z

- Por último nos queda el eje Y, que al medir entre sus terminales con el multímetro no nos da señal de continuidad. Al ser un final de carrera fácil de retirar se ha saneado sus terminales y probado de nuevo a medir su continuidad, dándonos el mismo resultado que la anterior prueba.



Figura 3.20: Final de carrera del eje Y

Viendo las opciones del mercado para poder sustituir el sensor roto y sabiendo que éstos finales de carrera ya no se fabrican con este modelo, se va a sustituir por un final de carrera comercial sin pistón metálico.



Figura 3.21: Final de carrera mecánico sin pistón metálico

Al no ser igual este sensor que su predecesor, cuando el eje Y se encuentra en movimiento, los topes metálicos no palpan con éste. La solución más rápida es diseñar unos topes mecánicos nuevos en acero para adaptar este sensor al eje. Los planos de los topes se podrán encontrar en los ANEXOS del proyecto. Estos topes deberían de funcionar de tal manera que cuando el final de carrera palpe con la superficie se accione, pero que no ejerza ninguna presión excesiva que pueda afectar a la vida útil del mismo. Por eso se coloca el sensor nuevo en el eje y con un calibre se toman todas las medidas necesarias.

Se debe de tener en cuenta como medida de seguridad que si el sensor hace contacto con el tope y se pasa de recorrido no se lleve por delante el final de carrera, por eso se realizara un chaflán suave acabando en un plano horizontal. Hay que realizar un total de dos topes y uno debe de ser fabricado

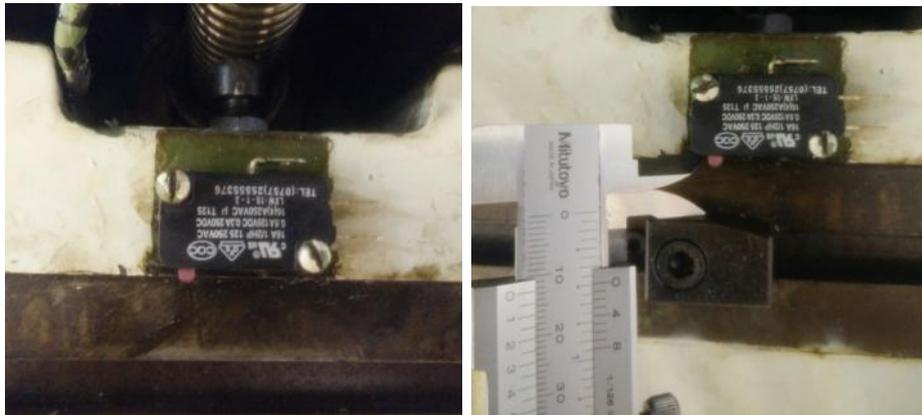


Figura 3.22: Colocación y toma de medidas del nuevo sensor

en espejo. Gracias a estar en un taller de mecanizado se dispone de un gran abanico de posibilidades a la hora de fabricar nuestras propias piezas, algo que sin duda baja el presupuesto de nuestro proyecto. Obtenido el modelo, y los planos del mismo, solo queda mecanizar la pieza in situ. En la figura 3.23 puede apreciarse el resultado de la fabricación de los nuevos topes para el eje Y.

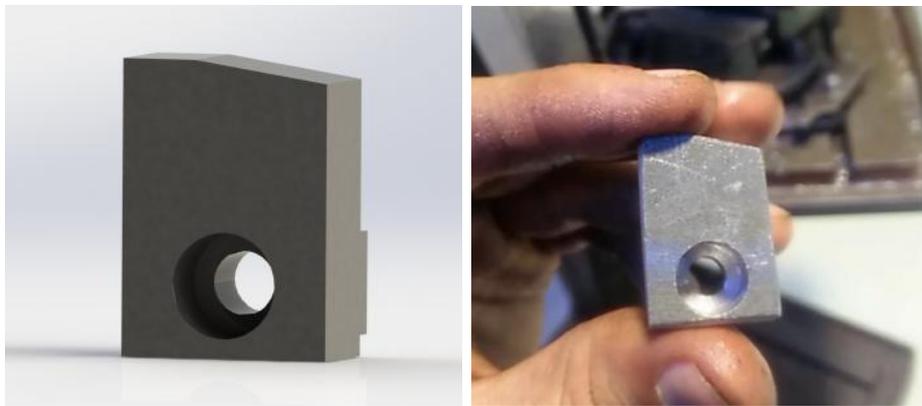


Figura 3.23: Modelo 3D del tope mecánico diseñado a la izquierda y tope mecanizado a la derecha

Como resultado de las operaciones de mecanizado que se han aplicado las dos piezas presentan rebabas afiladas que son peligrosas para su manipulación. Para tener un acabado decente en la pieza se optó por recurrir al uso de una lima de metal para rematar los cantos de las piezas y de ese modo eliminar cualquier rebaba cortante. Solo falta montarlas en la fresadora y comprobar que las dimensiones son las correctas y el sensor se activa al

palpar la superficie.



Figura 3.24: Topes montados

Los topes se ajustan en cada eje con la intención de aprovechar el máximo espacio de trabajo posible.

En el eje Z se ha tenido que limitar el recorrido de desplazamiento debido a que, cuando se lleva el husillo al origen, presenta unos esfuerzos mecánicos que atasca dicho eje. Se ha previsto del diseño de un taco de 20mm de espesor para desplazar el final de carrera y así evitar que surja algún problema durante las operaciones de mecanizado. (Ver Fig. 3.25)



Figura 3.25: Detalle del taco situado en el eje Z

El espacio queda acotado por  $X=400$ ,  $Y=200$ ,  $Z=80$  mm. Verificado el correcto funcionamiento de los topes con respecto al sensor, se da por acabado un buen trabajo realizado, ya que tanto mecánica como eléctricamente se ha comprobado al detalle un correcto funcionamiento del conjunto.

### 3.2.1.1. Aislamiento contra el ruido eléctrico o interferencias

Por ruido se entiende toda componente de tensión o intensidad indeseada que se superpone con la componente de señal que se procesa o que interfiere con el proceso de medida [10].

El ruido de un sistema se puede clasificar en uno de los dos siguientes grupos:

- Ruido interno o inherente: que corresponden al que se genera en los dispositivos electrónicos como consecuencia de su naturaleza física (ruido térmico, ruido por cuantización de las cargas, ruido de semiconductor, etc.). El ruido inherente es de naturaleza aleatoria.
- Ruido externo o interferencias: que corresponde al que se genera en un punto del sistema como consecuencia de acoplamiento eléctrico o magnético con otro punto del propio sistema, o con otros sistemas naturales (tormentas, etc.) o construidos por el hombre (motores, equipos, etc.). El ruido de interferencia puede ser periódico, intermitente, o aleatorio. Normalmente se reduce, minimizando el acoplo eléctrico o electromagnético, bien a través de blindajes, o bien, con la reorientación adecuada de los diferentes componentes y conexiones.

El ruido se puede abordar desde dos puntos de vista,

- Mediante métodos que tratan de reducir el ruido en sus fuentes y en su propagación, como son las técnicas de cableado, blindaje, o diseño de dispositivos de bajo ruido. Estas técnicas son las más óptimas ya que no degradan las prestaciones del sistema, aunque su aplicación no siempre es eficaz o posible.
- Mediante métodos de filtrado y promediado de la señal, para amortiguar el nivel de ruido frente a la señal que se procesa. Estas técnicas suelen ser de aplicación más general y efectiva, pero suelen reducir las prestaciones (por ejemplo, anchura de banda) del sistema.

En un sistema donde se pueden encontrar multitud de fuentes de ruido eléctrico es necesario establecer unas medidas que ayuden a eliminar o atenuar dicho problema. Los principales elementos afectados en nuestro sistema de control serían los propios controladores y sus pines digitales. En este caso nos afectaría a los finales de carrera, ya que comparando con proyectos de construcción de CNC caseras este problema era muy común y la solución no

esta a veces muy definida. El ruido eléctrico y las interferencias puede provocar que la fresadora detecte falsos accionamientos de los finales de carrera deteniendo el proceso de mecanizado.

Nuestras principales fuentes de ruido son:

- Motores trifásicos de la fresadora.
- Motores PaP de movimiento de los ejes.
- Fuentes de alimentación del sistema.

Uno de los posibles factores que cause el ruido eléctrico es el acoplamiento inductivo. Se trata de ruido acoplado magnéticamente y es un efecto basado en la corriente. Todo conductor por el que fluya corriente posee un campo magnético asociado. Una corriente cambiante puede inducir corriente en otro circuito, aunque dicho circuito sea un solo lazo; dicho de otra forma, el circuito fuente actúa como transformador principal y el circuito de destino se convierte en el secundario. El efecto del acoplamiento inductivo aumenta con los siguientes factores: (1) mayor flujo de corriente, (2) mayor velocidad en el cambio de corriente, (3) proximidad de dos conductores (principal y secundario) y (4) aumento de semejanza del conductor adyacente con una bobina (diámetro redondo en vez de plano, o bobinado en lugar de recto).

Para evitar que los cables de los motores, que transportan una gran cantidad de intensidad y están muy pegados, causen un ruido por acoplamiento inductivo a los cables de los finales de carrera se ha optado por tomar dos medidas:

- Hacer uso de cable apantallado para la conexión de los finales de carrera hasta la entrada de la caja de control. El cable utilizado para este fin será un cable apantallado de categoría 6, de 4 hilos (Ver Fig. 3.26). El extremo de cable que entre a la caja de control será mínimo y la malla del mismo ira conectada a masa por un solo extremo. Los cables de señal de cada final de carrera que no estén recubiertos por la malla deberán ir trenzados para así minimizar las posibles perturbaciones.
- Diseñar una pequeña placa con tres relés y unas resistencias pull-up. esta placa lo que hará es aislar la señal de entrada a nuestro controlador, reduciendo también el cable de señal que se conectara a la misma (Ver Fig. 3.27). Los relés alimentan las bobinas con 5V de una fuente independiente, que hace circular esa tensión por todo el cable de los

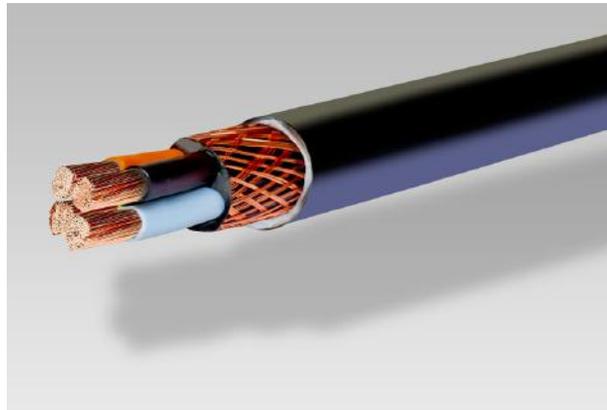


Figura 3.26: Cable apantallado

finales de carrera que están en una disposición normalmente abierta (NO). Cuando el final de carrera sea activado cerrará el circuito que alimentará la bobina accionando el interruptor de salida. En el esquema de la figura 3.28 quedan definidas las conexiones de la placa.



Figura 3.27: Placa con relés

A la izquierda de los relés según el anterior esquema es donde se conectarían los finales de carrera, cada uno en los pines de cada relé correspondiente. Éstos están a su vez conectados a una fuente de alimentación que le suministra 5V de tensión a la bobina al detectar el final de carrera y de este

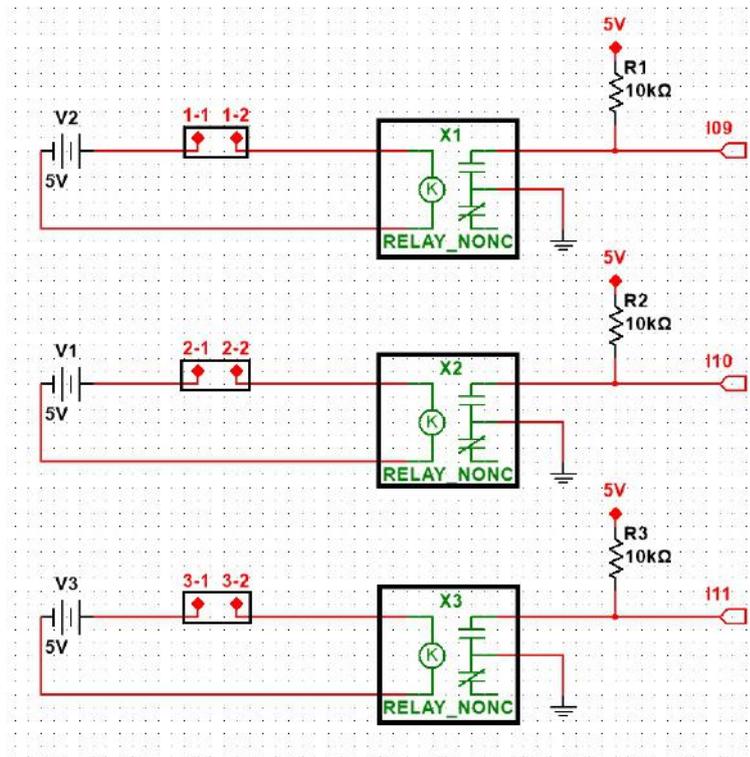


Figura 3.28: Esquema de conexiones de los relés

modo cerrando el circuito. En el lado derecho de los relés se encuentran los pines digitales de Arduino que se encargan de avisar cuando ha sido cerrado un final de carrera. estas entradas tienen cada una una resistencia pull-up que mantiene a nivel alto la señal mientras no detecta pero que al detectar el relé cierra el contacto NO mandando la entrada a baja señal. El hecho de poner una resistencia pull-up es debido a que es más difícil que por un ruido baje la tensión lo necesario para que detecte una señal de nivel bajo.

### 3.2.2. Motores fresadora Aizpurua T-30-CNC

Debido a los años sin uso y pérdida de contacto con los usuarios que manejaban antiguamente ésta fresadora CNC, no se han podido obtener las especificaciones técnicas de los motores. La idea es reutilizar estos viejos motores armados en la estructura para el manejo de los movimientos cartesianos de la máquina, puesto que están en buen estado aparentemente.

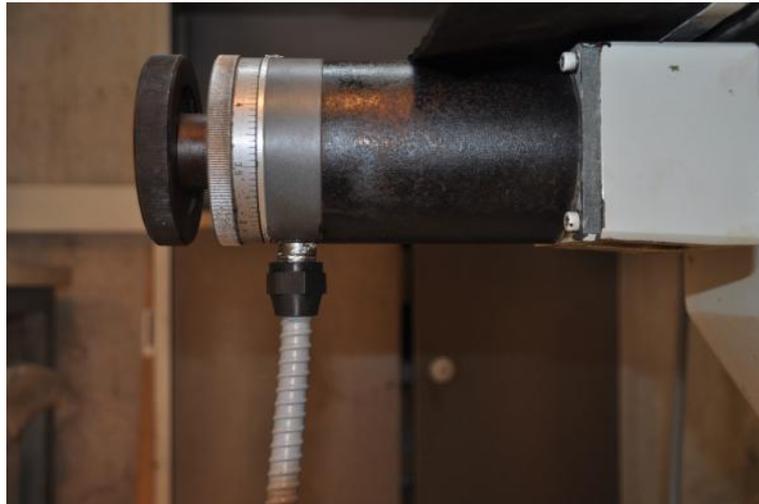


Figura 3.29: Motor montado en la fresadora Aizpurua T-30-CNC

En primer lugar hay que identificar de qué tipo de motor se trata. A diferencia de los motores de corriente continua que giran a todo lo que dan cuando son conectados a la fuente de alimentación, los motores paso a paso solamente giran un ángulo determinado. Los primeros sólo disponen de dos terminales de conexión, mientras los otros pueden tener 4, 5 o 6, según el tipo de motor que se trate, por otro lado los motores de corriente continua no pueden quedar enclavados en una sola posición, mientras los motores paso a paso sí. Los motores que vienen montados en la fresadora se deducen como motores paso a paso, ya que tienen visibles cuatro terminales. Este motor tiene dos bobinas con una configuración bipolar, ya que para que sea unipolar se necesitan mínimo 5 cables. Para cerciorarnos de que configuración de bobinado tienen en su interior (Serie o Paralelo) y para medir la resistencia en las bobinas del motor se aprovechará que hay que abrir el motor del eje Y para hacer un recableado, ya que uno de sus 4 terminales está suelto de la bobina que le correspondería. Esto servirá también a la hora de elegir los controladores, ya que en caso de tener una configuración en paralelo hay que tener en cuenta que los motores consumirán el doble y por tanto unos controladores que suministren insuficiente corriente se calentarán en exceso

reduciendo la vida útil de los mismos.

Hay que desmontar el volante para dejar al descubierto la tapadera trasera que cubre las conexiones del motor. Una vez hecho eso solo hay que desatornillar los 4 tornillos que sujetan esta tapadera.



Figura 3.30: Detalle de los cables que salen de las bobinas del motor

Al dejar descubierta la parte de conexionado de las bobinas del motor se ve por fin que la configuración del bobinado del motor, que se encuentra en Bipolar Paralelo, ya que se aprecia la unión de dos terminales de las bobinas en un solo punto, en el cual se extraen al exterior los cables de conexión. Una vez cableadas las conexiones del motor y rotado a su posición original el motor quedaría de esta forma.

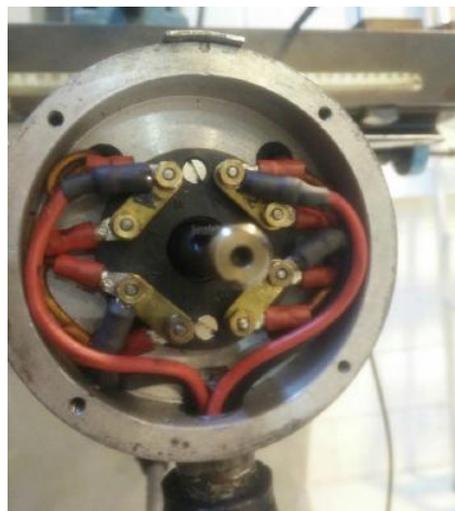


Figura 3.31: Colocación del motor ya cableado

El siguiente paso que nos quedaría sería comprobar la resistencia en el

bobinado del motor con el multímetro. Esto servirá para conocer la cantidad máxima de corriente que es capaz de soportar el motor. Al medir su resistencia nos da un valor de:

$$R = 0,7\Omega$$

### 3.2.3. Armario eléctrico

Actualmente la fresadora solo tiene operativos los motores trifásicos principales de movimiento, como el de movimiento vertical en columna y el de rotación del cabezal, que dispone de la posibilidad de giro en ambas direcciones así como dos gamas de velocidades. Para toda maquinaria que esté dotada de motores trifásicos, se debe tener en cuenta una serie de protecciones que evitan la ruptura de los motores, y así, evitar ciertos incidentes. Bajo el código eléctrico nacional se establecen unos requisitos mínimos para este fin. Nuestra fresadora tiene dos motores y revisando el armario eléctrico que hay en la parte posterior de la misma, podremos diferenciar ciertos componentes de los que se hablarán a continuación.

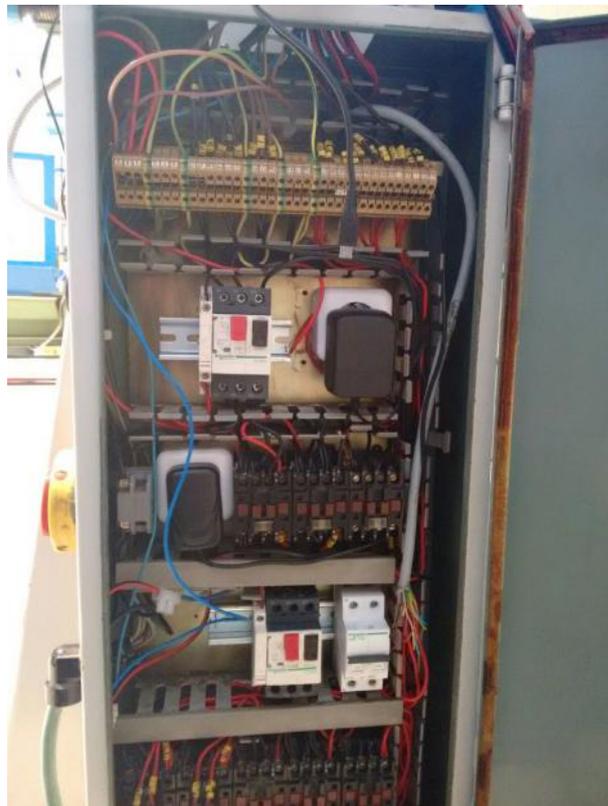


Figura 3.32: Armario eléctrico de la fresadora Aizpurua T-30-CNC

Se puede apreciar principalmente 4 elementos de protección:

- Guardamotor magnetotérmico. es un interruptor magnetotérmico, especialmente diseñado para la protección de motores eléctricos. Este

diseño especial proporciona al dispositivo una curva de disparo que lo hace más robusto frente a las sobrintensidades transitorias típicas de los arranques de los motores. Proporciona protección frente a sobrecargas del motor y cortocircuitos, así como, en algunos casos, frente a falta de fase.



Figura 3.33: Guardamotor magnetotérmico

- Interruptor Termomagnético. Los interruptores termomagnéticos se utilizan, en primer término, para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos a los cables y conductores eléctricos. Estos interruptores se encuentran equipados con dos dispositivos de protección conectados en serie, y que reaccionan gracias a dos efectos que produce la corriente eléctrica cuando circula por un conductor: temperatura y campos magnéticos. Por esto, estos dispositivos están equipados con un disparador térmico que actúa durante la aparición de sobrecorrientes bajas (sobrecargas) y de un disparador magnético para las sobrecorrientes elevadas.



Figura 3.34: Interruptor termomagnético

- Contactores. Son un componente Electromecánico que tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente de elevada tensión, ya sea en el circuito de potencia o en el circuito de mando, tan pronto se dé tensión a la bobina. Tiene la capacidad de cortar la corriente eléctrica de un receptor o instalación, con la posibilidad de ser accionado a distancia, que tiene dos posiciones de funcionamiento: una estable o de reposo, cuando no recibe acción alguna por parte del circuito de mando, y otra inestable, cuando actúa dicha acción. Este tipo de funcionamiento se llama de "todo o nada". En los esquemas eléctricos, su simbología se establece con las letras KM seguidas de un número de orden.



Figura 3.35: Contactor

- Conector auxiliar. Los llamados "circuitos de esclavización y de señalización" se realizan mediante contactos auxiliares que se incorporan a los contactores, a los contactores auxiliares o a los relés de automatismo, o que ya están incluidos en los bloques aditivos que se montan en los contactores y los contactores auxiliares. En el caso de este cuadro eléctrico hay dos conectores auxiliares, en los contactores que intervienen en la dirección de giro del cabezal de corte y que evitan mediante la conexión y desconexión que los dos contactores puedan activarse al mismo tiempo. La conmutación todo o nada también puede realizarse con relés y contactores estáticos. Del mismo modo puede integrarse en aparatos de funciones múltiples, como los disyuntores motores o los contactores disyuntores.



Figura 3.36: Conector auxiliar

### 3.3. Selección de componentes del sistema de control

En base a nuestros objetivos de crear un sistema de control en lazo abierto con una metodología *Open Source*, con un alto nivel de resolución a costa de reunir componentes de calidad a un precio competitivo, en esta sección se van a mencionar los componentes elegidos del capítulo 2. Del mismo modo se verán reflejados todos los pasos que son necesarios para la composición del sistema de control, desde su diseño a su implementación. Una vez seleccionados los componentes que van a formar nuestro sistema de control hay que centrarse en la forma de congregar todos ellos en una caja que será el armario de control, que medidas debe de tener, donde irá dicha caja, componentes adicionales, etc. La idea es que nuestro sistema de control ocupe el mínimo espacio, tenga altas prestaciones y sea una alternativa a tener instalado un ordenador de sobremesa al lado de la fresadora que ocuparía mucho más espacio en el taller.

Al estar todos los componentes dentro de la caja de control es preciso que exista la posibilidad de comunicarse con el computador, principalmente para introducir en el entorno de trabajo los G-code que sean necesarios en cada momento. Por ello es necesario contar con un conector USB que pueda ser empotrado en el armario de control.

### 3.3.1. Selección del hardware

1. CONTROLADORES: dentro de las opciones vistas con anterioridad, se ha optado por los controladores AUDIX Technology, dada la mecánica de la fresadora y los motores que lleva instalados se necesitan unos controladores que sean capaces de suministrar la potencia necesaria para el movimiento de los ejes, para que a la hora de mecanizar, la resistencia de los materiales no sea un inconveniente para la pérdida de pasos de los motores. Estos controladores son los que más se ajustan a nuestras necesidades ya que lo tienen todo en cuanto a potencia, además de la cantidad de subdivisión de pasos que nos ofrece y sus protecciones.

Nuestros motores son de 200 pasos/revolución, si dividimos  $360^\circ$  (1 revolución) entre los 200 pasos/revolución, nos da un ángulo de  $1,8^\circ$ . Este valor puede reducirse si se emplea un motor con más pasos por revolución, por ejemplo, para un motor de 400pasos/rev se obtiene un ángulo de  $0,9^\circ$ . Con los controladores podemos hacer una división de los pasos para poder hacer que el ángulo de giro sea incluso menor.

Como nuestro giro de motor provoca un desplazamiento de 5mm por cada vuelta, usando la división 1/8 se tendrán:

$$1600(\text{pasos}/\text{rev})/5(\text{mm}/\text{rev}) = 320(\text{pasos}/\text{mm})$$

2. COMPUTADOR: para la realización del proyecto se va a optar por la versión de la placa Raspberry pi 2, ya que respecto a su hermana mayo, no existe mucha diferencia en sus características excepto por tener Wifi y bluetooth integrado, añadiduras de las que no se hará uso en este proyecto.
3. ARDUINO: es hoy en día el favorito con diferencia para ejecutar este tipos de proyectos y en el que se están implementando la mayoría de firmwares.

### 3.3.2. Selección del firmware

El ganador en este apartado fundamental es con diferencia el firmware Grbl, ya que aunque Marlin esta basado en Grbl está más bien dedicado al sector de la impresión 3D. Por el contrario Grbl está especialmente diseñado para el control de las máquinas de control numérico como fresadoras y tornos, y que hoy por hoy, sigue en crecimiento y en la ampliación de sus principales funciones gracias a su gran comunidad.

### 3.3.3. Selección del software

De la multitud de opciones que se presentaron se ha decantado por el software bCNC, sin duda una herramienta muy potente y completa que está especialmente optimizada para la instalación en computadores poco potentes como puede ser en este caso la Raspberry Pi 2. La guinda del pastel para la decantación por bCNC está en que al igual que Grbl, dispone de una gran comunidad de personas que continuamente van ampliando las funciones de este software.

### 3.3.4. Fuente conmutada de los controladores

La fuente de alimentación empleada es una fuente conmutada de 50V que tiene la misión de suministrar la energía necesaria a los tres controladores de los ejes de nuestra máquina de control numérico. Entre las características de esta fuente se encuentran su elevada eficiencia, su baja temperatura de funcionamiento, su reducido tamaño y su circuito de protección integrado. Es capaz de proporcionar una potencia máxima de 720W, siendo alimentada por una entrada de corriente alterna que puede variar desde los 94V hasta los 240V, y en la que su salida es capaz de suministrar entre 12V-50V de corriente continua.



Figura 3.37: Fuente conmutada para la alimentación de los controladores

### 3.3. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL<sup>89</sup>

La corriente de salida varía con respecto a la tensión que se quiera ajustar, incrementando a medida que se disminuye la tensión de salida. Entre los diferentes rangos de tensión que puede ofrecer esta fuente (12-48V), se alimentarán los controladores con 48V-15A. Una de las características de este tipo de fuentes es que, normalmente, tienen varios conectores de salida que nos vendrán muy bien por si en un futuro se quiere añadir un cuarto eje a la fresadora

#### 3.3.5. Fuente ATX

La fuente conmutada esta es de uso exclusivo para los controladores de los motores ya que la tensión que proporciona a su salida se ha establecido e los 48V, ya que los demás elementos de control tiene una menor tensión de alimentación. Por ello hay obtener esta tensión de alguna parte, por lo que se ha seleccionado una fuente ATX que nos proporcionará una cantidad variada de tensiones con las que se puede alimentar a todo el resto de la electrónica. Se elegirá esta fuente por lo fácil que es de conseguir, evitando usar distintos transformadores para alimentar cada dispositivo por separado, la versatilidad que ofrece y por ser la opción más barata para el uso que se le va a dar.



Figura 3.38: Fuente de alimentación ATX

Esta fuente será la encargada de alimentar el Arduino Uno, la Raspberry Pi, los ventiladores y los relés, tanto de la placa hecha para los finales de carrera como los relé encargados de controlar el motor que gira el mandrino con la herramienta de corte.

Cada color de cable nos proporciona una tensión diferente como se ve en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Salidas de tensión de la fuente ATX

<b>Naranja</b>	3.3V
<b>Rojo</b>	5V
<b>Amarillo</b>	12V
<b>Azul</b>	-12V
<b>Morado</b>	VSB 5V
<b>Negro</b>	GRND
<b>Verde</b>	Activación referenciado a GRND

Hay que puentear el cable de color verde con GND para hacer funcionar la fuente ATX. En la tabla 3.2 se muestran las salidas necesarias para alimentar los elementos de control.

Tabla 3.2: Elementos de control a alimentar

<b>Arduino Uno Rev.3</b>	+12V/GND
<b>Raspberry Pi 2</b>	+5V/GND
<b>Ventiladores</b>	+12V/GND
<b>Reles FC</b>	+5V/GND
<b>Relés motor mandrino</b>	+5V/GND

### 3.3.6. Periféricos

Puede ser fácil concebir la creación de una fresadora que contenga el ordenador en su interior por el hecho de compactar todo el sistema sin necesidad de perder prestaciones. Pero aun con el ordenador integrado en la misma máquina no se podría controlar si no fuera gracias a los periféricos. Periférico es la denominación genérica para designar al aparato o dispositivo auxiliar e independiente conectado a la unidad central de procesamiento de la computadora.

Se considera periférico al conjunto de dispositivos que sin pertenecer al núcleo fundamental de la computadora, formado por la unidad central de procesamiento (CPU) y la memoria central, permitan realizar operaciones de entrada/salida (E/S) complementarias al proceso de datos que realiza la CPU. Hay dos tipos de periféricos, los de entrada y los de salida aunque se puede ver alguna combinación de los dos anteriores.

Se van a exponer algunos de estos periféricos y después se hará hincapié en cual se va a seleccionar y el porqué.

### 3.3. SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE CONTROL<sup>91</sup>

- Entrada: captan y digitalizan los datos de ser necesario, introducidos por el usuario o por otro dispositivo y los envían al ordenador para ser procesados como el teclado, ratón, panel táctil, micrófono, escáner.
- Salida: son dispositivos que muestran o proyectan información hacia el exterior del ordenador como un monitor, una impresora o altavoz.
- Entrada/Salida: sirven básicamente para la comunicación de la computadora con el medio externo ejemplos de ello lo son una pantalla táctil, impresora multifunción o casco visual.

La comunicación con el computador se establecerá mediante estos periféricos:

- Teclado ergonómico con touchpad. Este teclado inalámbrico se combina con funciones de ratón a aire y una superficie táctil, lo cual combinado con su reducido tamaño, su diseño ergonómico y la distancia máxima de detección de 10m lo hacen el perfecto complemento. AL tener estas características es muy cómodo poder controlar el computador de la fresadora incluso estando de pie.



Figura 3.39: Periferico de Entrada

- Monitor. Es el principal dispositivo de salida (interfaz), que muestra datos o información al usuario, lo que sin él, de nada serviría tener periféricos de entrada. Es necesario el uso de un monitor para visualizar y controlar la fresadora por eso se ha instalado un antiguo monitor plano en el brazo que encauza los cables desde panel de control a el armario eléctrico. Se pueden apreciar en las siguientes imágenes:



Figura 3.40: Periferico de salida (Monitor)

### 3.4. Selección del diseño

Es recomendable adquirir los archivos CAD una vez elegidos los componentes que irán en el interior o exterior armario de control, ya que se pueden diseñar configuraciones previas al montaje in situ. Al diseñar las posibles configuraciones pueden estudiarse las ventajas y desventajas de las mismas pudiendo tomar decisiones que permitan con antelación un cambio a mejor de nuestro sistema.

La mayoría de diseños de los componentes están realizados por usuarios y pueden encontrarse en paginas de internet dedicadas a compartir archivos CAD, como puede ser grabcad.

Obtenidos todos los Archivos CAD necesarios, nuestro objetivo será organizarlos en un espacio de manera que sea mínimo y que a la misma vez sea cómoda tanto la instalación, sustitución y operación de los componentes.

### 3.4.1. Configuración horizontal

#### 3.4.1.1. MODELO N°1 H

Este modelo surgió como opción adicional a un establecimiento de los controladores en vertical para dejar más espacio en la parte inferior de la caja y que las tarjetas de control estuvieran presentadas de forma más accesible para la instalación o futuras revisiones. En la parte superior están situados dos controladores de los motores en serie colocados por encima de la canaleta de cableado principal. Debajo de esta canaleta se encuentra el tercer controlador de control en la parte izquierda, quedando un espacio considerable a la derecha para colocar tanto la Raspberry Pi como el Arduino.



Figura 3.41: Modelo N°1 del armario de control

Únicamente se ha presentado un diseño debido a una cuestión de seguridad importante como la disipación del calor, ya que la importancia de la temperatura hace que se acorte o se alargue más la vida de todo aparato electrónico. Se sabe que el calor tiende a ascender, por lo que una evacuación vertical del mismo ayudaría a mantener los controladores a una temperatura medianamente baja.

La fuente de alimentación esta presentada en el interior de la caja de control pero sería más recomendable de todas formas incluirla en la parte externa.

### 3.4.2. Configuración vertical

Dentro de esta configuración existen varios modelos posibles. Estos modelos siguen una evolución en base a las desventajas que ofrecen los modelos

anteriores.

#### 3.4.2.1. Modelo N°1 V

Este modelo fue el primero que se diseñó, y está basado en una agrupación espacial reducida de los componentes pero suficiente. Para llevarlo a cabo se tomaron las medidas de los componentes del conjunto y a raíz de eso se hizo el diseño de la caja contenedora.

Esta caja tiene un tamaño de 300x300x200. En el interior de la caja están ubicados los tres controladores en configuración vertical a una distancia de 40mm entre cada uno dejando un espacio muy justo para la colocación de la canaleta, donde irían alojados todos los cables que conectarían los controladores con el conjunto. Más abajo de los controladores iría la canaleta principal que sería la encargada de transportar la distribución principal de cableado de control, recogiendo así tanto los cables de los sensores, motores y demás componentes que entran a la caja y también los que comunican las tarjetas de control. Por otro lado la fuente de alimentación de los controladores quedaría ubicada en la parte izquierda de la caja en el exterior. (Ver Fig. 3.42)

Las ventajas con las que cuenta esta configuración es principalmente el tamaño ya que todos los componentes electrónicos quedan alojados en su interior ocupando el mínimo espacio requerido y la disposición de los controladores ayudan a que el calor disipado fluya a la parte superior de la caja.

Las desventajas de esta configuración también son claras, ya que una caja tan pequeña incluye que el montaje y las futuras revisiones periódicas puedan llegar a ser algo incómodas, puesto que al tener un espacio reducido entre controladores y la profundidad que éstos tienen hace que sea complicado el cableado desde las canaletas y el introducir la mano puede llegar a ser todo un reto.



Figura 3.42: Modelo N°1 del armario de control

### 3.4.2.2. Modelo N°2 V

En este modelo se opta por obtener una caja algo más adecuada para suplir las desventajas del modelo anterior, por lo que se aumenta el tamaño de la misma siendo las medidas de diseño de 400x300x200. Al redimensionar la caja también se ha introducido la fuente de alimentación en el interior.



Figura 3.43: Modelo N°2 del armario de control

Las ventajas en este caso son más evidentes ya que el incremento de tamaño de la caja se transforma en un espaciado entre los demás componentes aún habiendo incluido en la parte interna la fuente de alimentación de los controladores. La fuente se incluye por dos motivos más: para intentar protegerla de las condiciones externas que se pueden dar en un taller de mecanizado, donde la escoria, el polvo y la viruta son factores negativos para cualquier aparato eléctricos y a la vez que favorece estéticamente al conjunto

Existe el mismo problema que en el modelo anterior, por un lado se gana en espacio, pero al introducir la fuente de alimentación ese espacio se vuelve a perder. También influye el calor que disipa la fuente, puesto que no es recomendable el agrupamiento de varias fuentes de calor en espacios tan reducidos. El hecho de la incómoda disposición de las salidas de CC que alimentan a los controladores y el evitar posibles ruidos eléctricos que genere la fuente y pueda afectar a la electromagnética son desventajas muy negativas también para este modelo.

### 3.4.2.3. Modelo N°3 V

Se apreció que el tamaño de la caja del diseño anterior era suficientemente grande para una distribución cómoda y ordenada, suponiendo que la fuente de alimentación no quedara ubicada en el interior por diversos posibles problemas con la temperatura e interferencias electromagnéticas, que a día de hoy son la mayor enemiga de la electrónica pudiendo llegar a causar daños mayores. En este diseño se tienen en cuenta todos los aspectos negativos que se analizaron en los anteriores modelos manteniendo las dimensiones de la caja en 400x300x200. En la figura 3.44 se puede observar la colocación de los controladores de forma espaciada dejando suficiente distancia entre ellos para la buena manipulación del cableado que irá distribuido entre ellos a través de las canaletas.

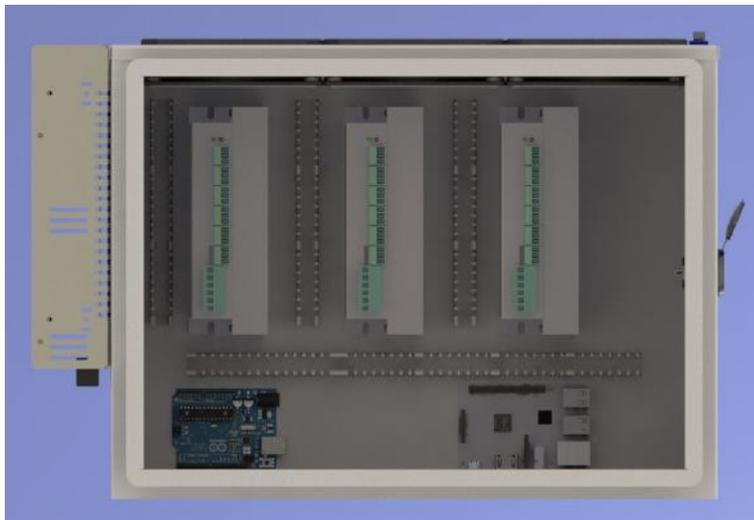


Figura 3.44: Vista frontal del armario de control

Se han hecho otros pequeños cambios en los laterales de la caja, donde en primer lugar, se puede observar que la fuente de alimentación de los controladores queda en la parte exterior de la cara izquierda, ajustada a la esquina superior derecha, que mecánicamente y electrónicamente no ofrece ninguna desventaja pero queda mucho mejor situada estéticamente.

En la parte derecha de la caja se ha decidido bajar el conector USB empotrado a la parte central de la misma debido a la colocación de un convertor HDMI-VGA que irá empotrado en la parte superior.



Figura 3.45: Vistas laterales del armario de control modelo N°3 V (primera imagen lateral izquierdo)

En los modelos anteriores, uno de los factores a evitar es que la electrónica que se localiza en el interior de la caja de control pueda verse víctima de una exposición continua al calor disipado por la misma, especialmente de los controladores de control de los motores. Por este motivo están situados justo encima de Arduino y Raspberry Pi. Para ayudar a la evacuación de este calor se ha dispuesto la colocación de tres ventiladores de 120mm a 12V en la parte superior de la caja. Además que se ha diseñado en SolidWorks una rejilla de protección para evitar que cualquier objeto grande o pequeño pueda colarse y romper alguno de ellos (Ver Fig. 3.46). Estas rejillas serán impresas con tecnología FDM por la impresora del Departamento de Ingeniería de los Materiales y Fabricación y estará impresa en ABS, un plástico capaz de aguantar temperaturas en torno a los 200°C lo que garantiza que será suficiente para nuestro fin. En la figura 3.47 se puede ver como quedarían los ventiladores y las rejillas colocados en la superficie de la caja.

Por último destacar la inclusión como se indicó anteriormente del puerto VGA empotrado en la parte superior derecha de la caja, donde se conectará un monitor que será el enlace HMI entre la máquina y el hombre para poder trabajar con la fresadora.

Por conclusión queda destacar que el MODELO N°3 con una configuración vertical es la opción más adecuada debido a que la mayor parte de

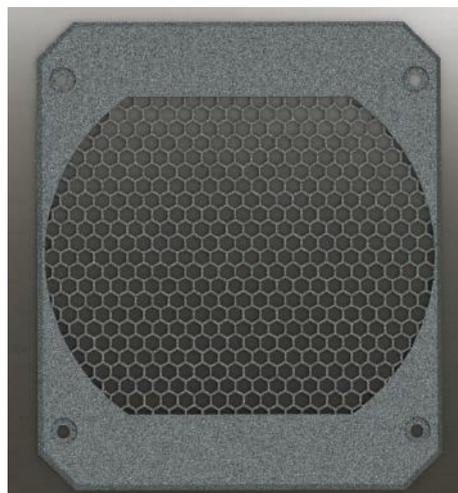


Figura 3.46: Diseño de la rejilla protectora del ventilador

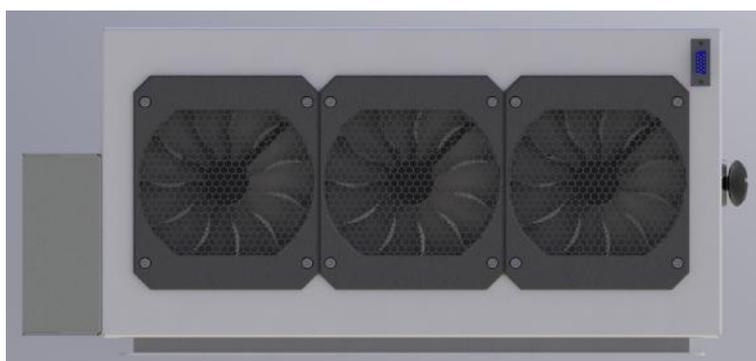


Figura 3.47: Vista superior del armario de control

desventajas que presentaban los modelos anteriores han sido pulidas.

## 3.5. Montaje del armario de control

El armario es una caja de pared de acero con una puerta con cierre hermético con protección contra el polvo IP66 y una protección IK10 contra impactos mecánicos, lo cual lo hace ideal para las condiciones en las que se encontrará. Tiene un tamaño de 400x300x200 mm y en su interior lleva integrada una placa de acero recubierta con una capa de zinc de 2mm para poder ensamblar más fácilmente los componentes y que a la misma vez hará la función de aislar los componentes del contacto directo con la caja.

### 3.5.1. Mecanizado de la caja

En primer lugar se va preparar la caja con los mecanizados necesarios para amoldarla al diseño que se mostró en la sección anterior.

Para realizar las operaciones, hay que marcar la posición exacta donde debe de ir cada elemento, que en este caso serían: el puerto USB, abrir la parte superior y realizar taladros para los ventiladores, taladrar el lateral izquierdo donde irá la fuente de los controladores, en la parte inferior realizar unos taladros para la fuente de alimentación general y otros dos taladros para las patas de la caja y por último los taladros que sujetaran la caja en su posición final justo encima del armario eléctrico en la columna aprovechando los taladros de acceso al husillo del motor de ajuste rápido vertical de la columna.



Figura 3.48: Taladros para sujetar fuente de alimentación de los controladores

En el caso de los mecanizados en la parte superior de la caja se tomará

como referencia de medición el centro de la superficie para establecer el centro del rectángulo metálico que se extraerá. Aquí en esta imagen se ve todos los mecanizados que van a aplicarse en esta superficie. (Ver Fig. 3.49)

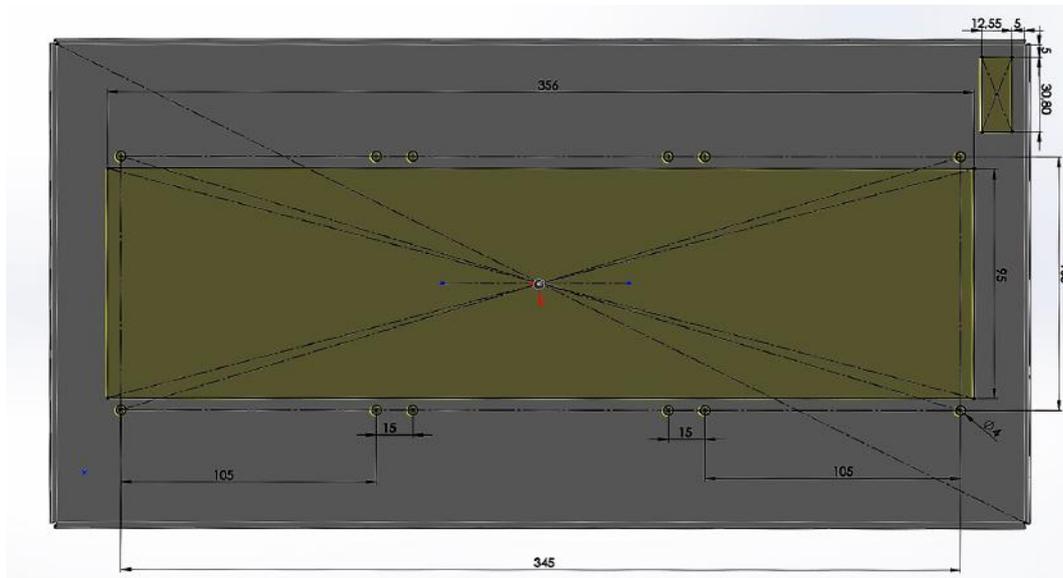


Figura 3.49: Secciones superiores de fijación de ventiladores y VGA

El puerto USB se situará en el lateral derecho de la caja justo en la parte central de dicha cara. Las dimensiones de corte y posición se especifican a continuación en la figura 3.50.

Para evitar que todos los esfuerzos verticales debidos a la sujeción de la caja recaigan sobre los cuatro tornillos que la sostienen se han fabricado en el torno de el taller unas patas hechas a partir de un redondo de aluminio de 20mm. Las operaciones que se han realizado sobre este bruto son las de corte para igualar las dimensiones de ambas patas, refrentado de las dos caras, taladro de unos 30mm de profundidad y por último con un macho roscador se le ha generado una rosca. (Ver Fig. 3.51)

Por último queda realizar los taladros en la parte inferior para atornillar la segunda fuente de alimentación y las dos patas y también taladrar el fondo de la caja para poder fijarla en la parte posterior de la fresadora, y se tomarán las medidas de la distancia que separan los cuatro tornillos que sujetaban la tapadera de acceso al husillo del motor que se encarga de mover verticalmente el mandrino con la herramienta.

Efectuados estas últimas operaciones y probando que cada elemento encaja en su sitio se procede a la colocación de la caja en su emplazamiento.

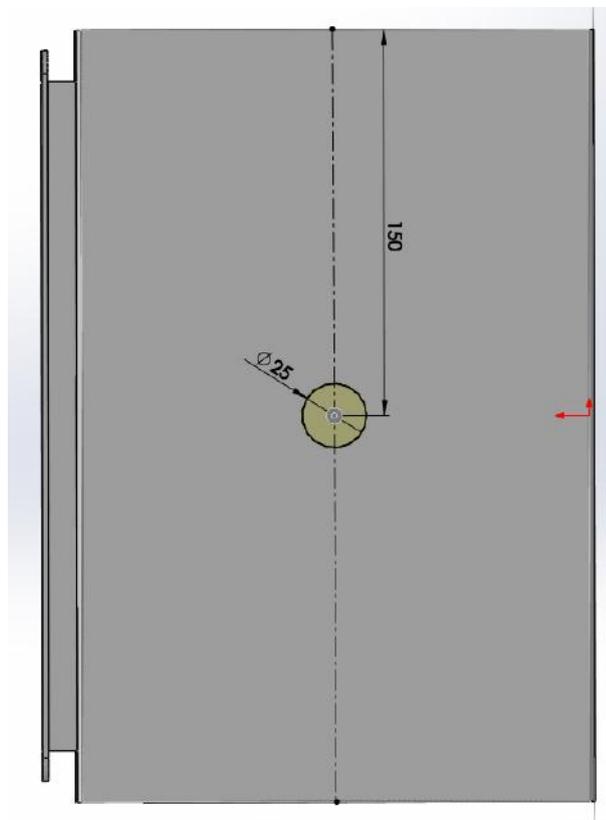


Figura 3.50: Orificio acople USB a mecanizar

(Ver Fig. 3.52)

Se puede apreciar que todos los componentes que deben de ir acoplados encajan perfectamente en su sitio. Es de gran importancia el haber realizado todas las operaciones con unas dimensiones lo más precisas posibles para así evitar que alguno de estos componentes tenga algo de juego u holgura.



Figura 3.51: Posición de las patas de apoyo



Figura 3.52: Posición final de la caja

### 3.5.2. Montaje del conjunto electrónico

Para realizar el montaje de todos los componentes de control, no hace falta descolgar la caja de su sitio establecido, ya que al tener una plancha de montaje es mucho más fácil poder realizar la colocación de cada uno de ellos.

Para la sujeción tanto de los controladores, Arduino y Raspberry Pi se ha decidido por atornillarlos a la misma plancha mediante el taladro de los orificios y posteriormente crear los correspondientes roscados. Realmente es muy cómodo el poder atornillar los todos estos elementos a la plancha, ya que en un futuro si hay que sustituir cualquier elemento no sería necesario más que desconectar el componente averiado , quitarle los tornillos y sustituirlo por otro completamente nuevo. El problema viene porque el espesor de la plancha es relativamente pequeño (2mm) para pasar un macho roscador pero será suficiente ya que los componentes son muy ligeros y las roscas no tendrán que soportar esfuerzos demasiados grandes. Los taladros se van a efectuar una vez dibujados sobre la placa la situación de los mismos. (Ver Fig. 3.53)

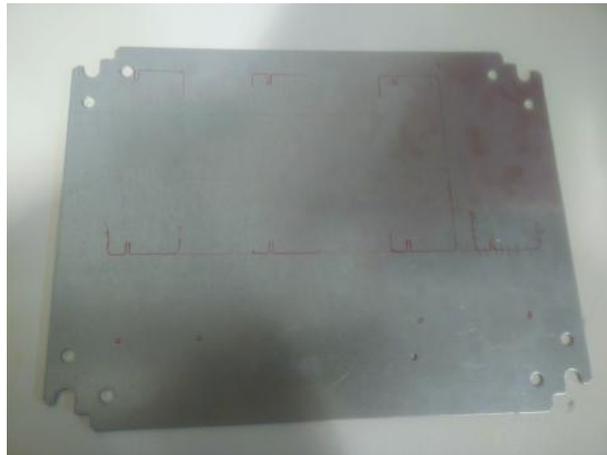


Figura 3.53: Marcación de los taladros a realizar en la plancha

Los controladores irán atornillados directamente a la plancha mediante el apoyo de su ranura inferior en un tornillo roscado desde la parte posterior de la plancha y la fijación de la ranura superior mediante la presión ejercida por la rosca de un tornillo plano. El contacto directo con la plancha ayudará también a la disipación del calor. Por otro lado no se puede sujetar directamente Arduino Uno y Raspberry Pi a la plancha. Para evitar que algunos de sus contactos creen un cortocircuito se han impreso dos bases en ABS para que su fijación a la plancha sea totalmente aislada. (Ver Fig. 3.54)

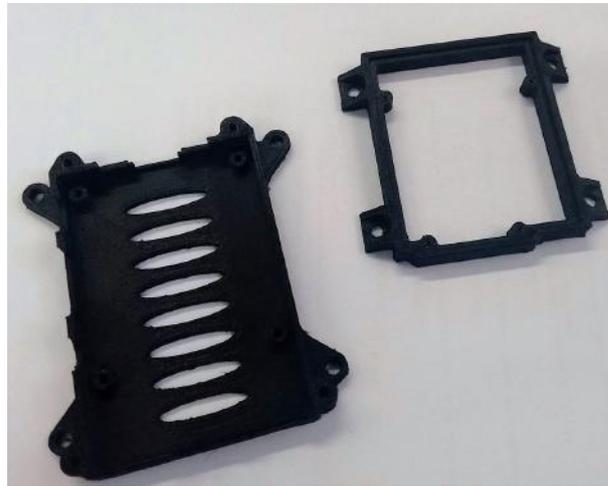


Figura 3.54: Bases en ABS; izquierda Raspberry Pi, derecha Arduino

Por seguridad durante la manipulación de la plancha se ha notado que los cantos de la misma presentaban unas rebabas (seguramente del corte de la misma en la fábrica) y puede llegar a ser peligroso trabajar con la misma en estas condiciones. Para evitar tener cualquier accidente durante el manejo de la plancha se han repasado los cantos en la amoladora y así poder matar dichas rebabas.

El siguiente paso sería fijar todos los componentes principales en la plancha justo en el lugar que corresponde, quedando como se muestra en la figura 3.55.

La instalación de los 3 ventiladores de 120mm es algo que puede hacerse cuando se coloca la plancha con todos los componentes en su sitio.

Habido ya colocado todos los componentes de este conjunto de control en lazo abierto solo queda introducirlo en la caja para pasar al siguiente paso que es el más tedioso: el cableado.

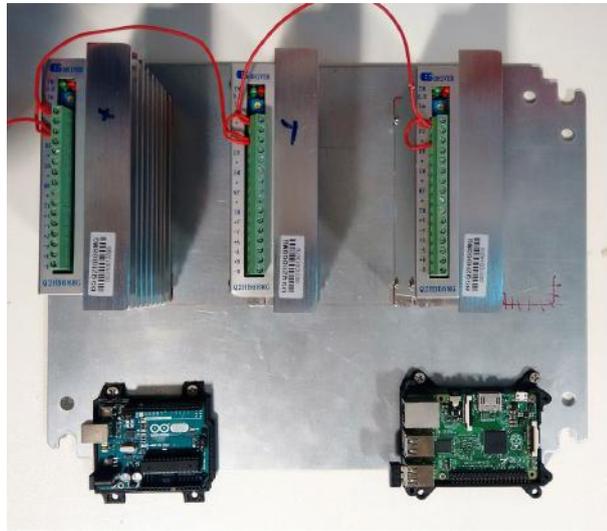


Figura 3.55: Presentación de los componentes montados en la plancha

## 3.6. Cableado y conexionado

Durante el cableado y conexionado de cualquier sistema de control hay que ser muy meticuloso puesto que es necesario tener en cuenta la importancia de realizar un correcto cableado. Si no se sigue un orden y no está todo bien clasificado y etiquetado puede ser un gran problema localizar averías en el caso que sucedan. Se ha realizado un diagrama de conexiones de cableado de nuestra máquina que se puede encontrar en el capítulo ANEXOS del proyecto.

### 3.6.1. Orden y distribución

En primer lugar hay que saber que en nuestro armario de control entran los cables de los motores (que contienen una elevada intensidad), cables de alimentación de 220V y los más importantes, los cables de señal, puesto que son los que se encargan de establecer el tráfico de información de todo el sistema y es bueno tener al margen en medida de lo posible estos cables de los de potencia o de los motores.

La mayor parte de los cables que llegan al armario de control viene desde o pasa a través del armario eléctrico. En la parte superior del armario eléctrico hay una tapadera con dos pasa-muros por la que antiguamente pasarían los cables del motor del eje Z y el final de carrera. Como al armario de control entran más cantidad de cables de los que pueden entrar por estos

dos pasa-muros, se va a aprovechar que hay espacio de sobra en la tapadera para realizar otro orificio donde, se colocará un pasa-muros del mismo tipo, reutilizando uno de la tapadera que se retiró y que daba acceso al husillo del motor de la columna. En esta tapadera se ha marcado el centro del nuevo taladro que se va a realizar y, empezando con una broca fina se irá aumentando el diámetro de la misma hasta terminar en una broca más grande llegando a alcanzar el diámetro justo para que el nuevo pasa-muros quede bien encajado. (Ver Fig. 3.56)

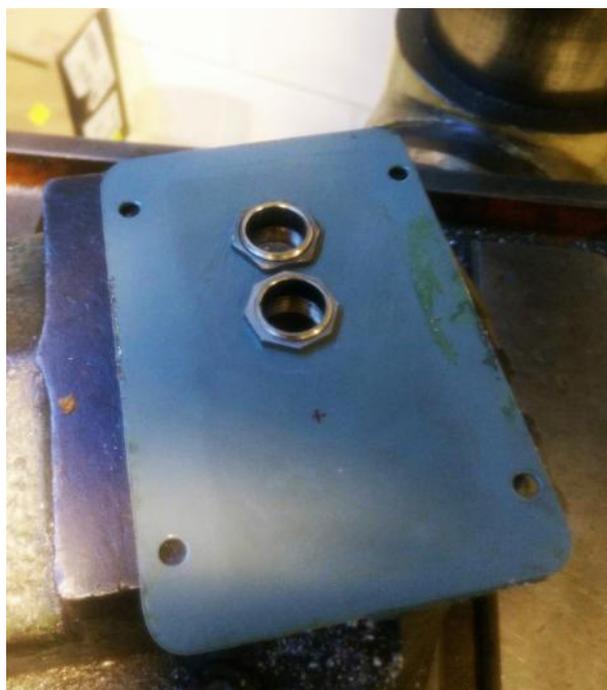


Figura 3.56: Tapadera del armario eléctrico preparada para taladrar

Con el nuevo pasa-muros ya se dispondrán de tres orificios por donde poder pasar el cable desde el armario eléctrico hacia el armario de control. Se realizará una división de cables para evitar siempre tenerlos mezclados, hay que recordar que tener un orden a la hora de realizar cualquier tarea es fundamental. Se empleará el pasa-muros de la izquierda para subir los cables apantallados de los finales de carrera, el pasa-muros central estará destinado a los cables de alimentación y el pasa-muros de la derecha lo usarán los cables de los tres motores PaP de la fresadora. (Ver Fig. 3.57)

Para empezar a decidir la longitud de cada cable es necesario en primer lugar tener la plancha con todos los componentes colocada, y una vez hecho esto hay que cortar las canaletas de cables y colocarlas en su sitio mediante

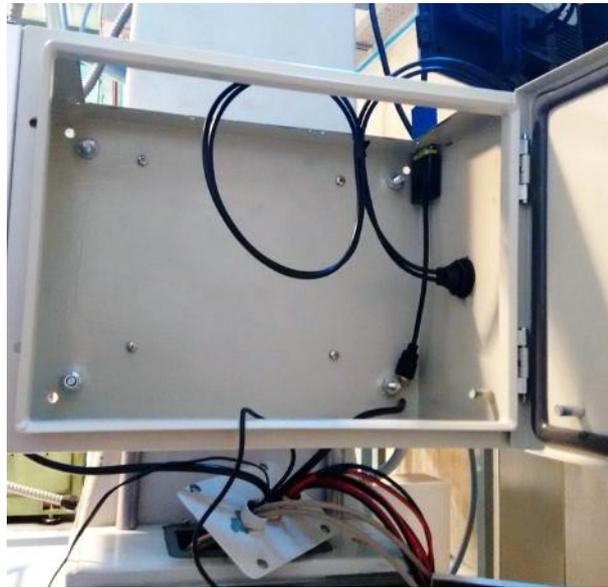


Figura 3.57: División del cableado que asciende al armario de control

una cinta adhesiva de doble cara.

La canaleta que se va a emplear es especial para usar en armarios de control que se cierra con una tapadera a presión que evita el deslizamiento de la misma, esta fabricada en PVC y es ideal por aguantar temperaturas superiores a los 60°C. (Ver Fig. 3.58)

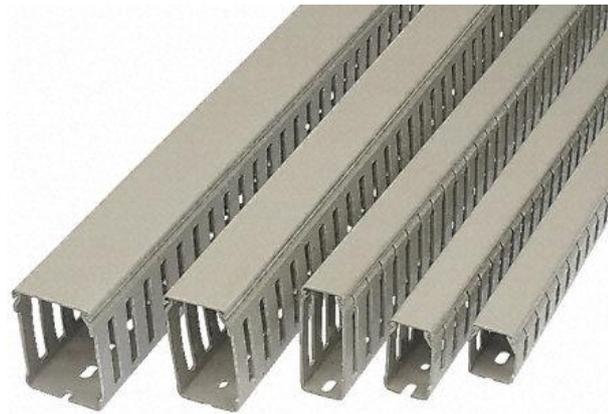


Figura 3.58: Canaletas para la distribución del cableado

Esta canaleta tiene unas dimensiones de 25mm de ancho y 50 mm de alto. El cable queda escondido en el interior en su interior y gracias a todas las ranuras que tiene en los laterales a lo largo de toda su extensión, es posible

extraer en cualquier momento el cable que se necesite, quedando el montaje estéticamente ordenado a la vez que práctico. La función principal de las canaletas será la de ocultar el cableado dentro de el armario de control y que es interconectado con todos los componentes que hay en su interior, de este modo solo se verá el mínimo y necesario cable posible. Una de las principales ventajas a parte del apartado estético que conlleva usar este tipo de canaletas es que a parte de proteger el cable de su interior en el caso de producirse alguna avería o ampliación del sistema se van a evitar los líos entre todos los cables que puedan quedar sueltos por la desconexión de los mismos. Las canaletas que deben de ir en la plancha según el modelo vertical N°3 son cortadas y colocadas en su lugar mediante la cinta adhesiva de doble cara. Para que esta fijación sea fuerte y más efectiva hay que limpiar con alcohol las caras donde se va a aplicar la cinta. Una vez las canaletas situadas se pueden introducir todos los cables por su interior y distribuirlos hasta donde tenga que ir cada uno de los mismos, de este modo es más fácil saber que cantidad de cable es necesario cortar para hacer una conexión ni con exceso de cable ni tampoco cortar de más haciendo que queden los cables tensos. Fuera de lo que es la plancha donde se albergan los componentes principales, se ha utilizado más de estas canaletas para recoger varios cables que recorren el armario de control, como pueden ser la alimentación de los ventiladores, relés, guiar los cables de la placa de relés de los finales de carrera que se ha colocado en la puerta del armario de control,...etc.

De la fuente de alimentación de los controlador situada a la izquierda del armario se sacan 6 cables de alimentación, 3 positivos y 3 negativos. Estos cables son conducidos por la parte inferior del armario donde se reúne con el grueso de cableado que sube desde armario eléctrico y asciende por las canaletas hasta llegar a cada controlador correspondiente, por lo que estos cables se han cortado del tamaño preciso al igual que los de los motores. El hecho usar cables independientes para alimentar cada uno se hace con el propósito de evitar hacer puentes de un ellos a otro, así cada uno con su alimentación la desconexión de uno de los integrantes no afectara al resto. Por otro lado los cables de la fuente ATX que también ascienden desde la parte inferior del armario eléctrico se subirán por el grueso central de cables para introducirlos en el armario de control e irán a parar a una regleta fijada en el lateral derecho de la caja y será donde se conecten todos los componentes electrónicos que se necesiten alimentar.

### 3.6.2. Alimentación monofásica

Las fresadoras de este tipo se alimentan con un cable de conexión basado en H07RN-F para corriente trifásica. Estos conectores son especiales para maquinaria y sistemas en obras, interiores secos y húmedos, así como uso a la intemperie.

El cable de alimentación que emplea ésta máquina de control numérico sigue una configuración pentapolar. Se tienen que alimentar algunos elementos monofásicos como lo son las fuentes de alimentación y la pantalla, y estos requieren de una tensión de 220V para su correcto funcionamiento. Las fases y el neutro están conectadas a unas regletas especiales anchadas en el carril din marcados con las letras correspondientes de las tres fases.

Los cables de alimentación de cualquier aparato que requiera una tensión de 220V tienen en el interior de la manguera una fase y un neutro y en la mayoría de ocasiones un cable de tierra también. Para poder adaptar la tensión de entrada para que alcance una tensión sobre los 220V se empleará una de las tres fases cualesquiera y un neutro y la tierra se conecta en cualquiera de las presentes y es aquí donde se va a resolver el problema de alimentación. El neutro se ha sacado con una regleta instalada en el lateral izquierdo del armario eléctrico para poder conectar todos los cables que se necesiten.

### 3.6.3. Conexión e identificación

A todos los cables tanto de control como de alimentación se les ha colocado en su extremo unos pines que facilitan la labor de conexión en sus terminales correspondientes. Esto es algo más profesional y necesario ya que se trata de un sistema compuesto por muchos cables y lo último que se quiere es que alguno de ellos acabe suelto o hiciera mal contacto con el paso del tiempo.

Se ha provisto la necesidad de identificar también cada cable con un marcador para evitar que una desconexión accidental o durante la manipulación de cualquier componente provoque cierta incertidumbre ya que es muy fácil equivocarse a la hora de volver a conectarlos, sobre todo en Arduino, donde las conexiones se establecen con pines a presión y si los cables están bien identificados no habrá ningún problema para colocarlos en su correspondiente entrada. La importancia de usar estos marcadores recae sobre todo en las conexiones que lleguen al Arduino y a las que se establecen con los controla-

dores de los motores.

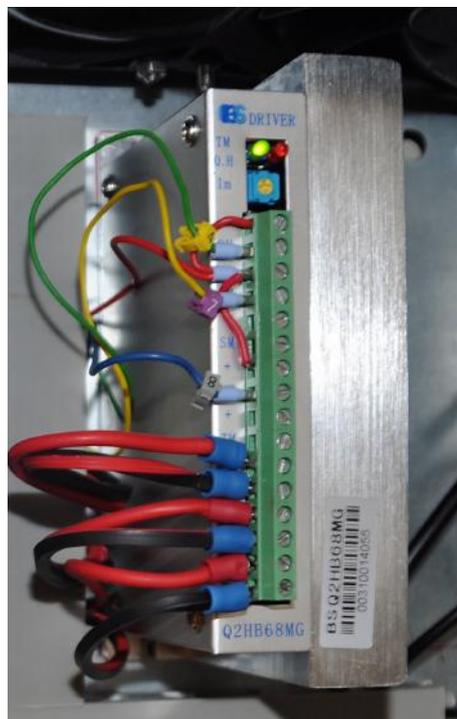


Figura 3.59: Detalle de las conexiones del controlador

En la figura 3.59 se puede apreciar el gran trabajo que se ha hecho con el cableado. Los marcadores únicamente van colocados en los cables de control del Arduino con el número de la salida correspondiente.

También es importante conocer la importancia que tiene conectar a tierra todo nuestro armario de control. Las instalaciones de cableado estructurado deben ser puestas a tierra. Se han usado unos terminales de conexión de tipo herradura o de aro que interconectan todas las partes metálicas del armario de control (la estructura principal y la puerta) y son llevadas a la tierra que se sitúa en las conexiones de el armario eléctrico.

Los cables que quedan visibles entre el armario eléctrico y el armario de control han sido cubiertos desde la salida de los pasa-muros hasta la entrada del armario de control por un gusanillo grueso con el fin de protegerlos y que la maraña de cables quede reducida a solo tres tubos que los transportan en su interior. Como resultado de todo este proceso, el armario de control queda montado y cableado como se pretendía en un principio.



Figura 3.60: Armario de control ensamblado

Al ver la figura 3.60 se puede identificar en un rápido vistazo y con gran claridad los principales componentes del armario de control, todo está ordenado, los cables que quedan a la vista son los mínimos requeridos ya que la mayor parte del mismo queda interno en las canaletas. A la derecha puede verse la regleta con las diferentes tensiones que genera la fuente ATX donde se alimentan todos los componentes del sistema excepto los controladores. La canaleta situada en el lateral derecho del armario conduce los cables de alimentación de los ventiladores y los relés y cables de la placa de los finales de carrera. La canaleta situada en la parte inferior de el armario de control canaliza todos los cables de los finales de carrera (tanto los que vienen de los sensores como las salidas de la placa de relés que se dirigen a las entradas del Arduino) y la alimentación del Arduino a la placa de relés.

En la figura 3.61 se aprecia mucho mejor la instalación de la placa con los relés que se ha hecho en la puerta del armario de control. Esta localización está pensada para un rápido y fácil acceso a esta placa.

Visto el armario de control desde el lateral derecho puede apreciarse mucho mejor como ha quedado posicionado el puerto usb y la fuente de alimentación ATX. (Ver Fig. 3.62)

El resultado final del montaje de todo el sistema ha quedado con un acabado tanto eléctricamente como estéticamente correcto y sobre todo muy compacto ya que las dimensiones del armario de control son muy reducidas en comparación del antiguo armario que la máquina traía consigo.



Figura 3.61: Vista lateral izquierda



Figura 3.62: Vista lateral derecha del armario cerrado; detalle del puerto usb



Figura 3.63: Vista superior del armario de control. Detalle de las rejillas de ventilación

### 3.6.4. Activación del motor principal

Hasta el momento la activación del motor de la fresadora se realizaba de forma manual mediante la pulsación de dos pulsadores y un botón que están situados en el panel de mando que incorpora. De los estos accionamientos los pulsadores activaban el motor a la vez que controlaban el giro, uno giraba en sentido horario y el otro en sentido anti-horario, y el botón central tenía como función dejar enclavado el giro del cabezal mientras este botón estuviera activado. Si el botón de enclavamiento estaba desactivado los pulsadores accionaban el motor de la fresadora mientras lo estuvieras manteniendo pulsado. Este método de activación manual es una solución tradicional que funciona perfectamente; tu puedes activar la fresa cuando comienzas a trabajar y apagarla cuando termina pero si no estas presente el motor seguirá activo aún acabado el proceso de mecanizado.



Figura 3.64: Accionamientos funcionales del panel de control

1. Pulsadores y botón de accionamiento del motor de fresado.
2. Selectores. El de la izquierda activa el motor de la columna acercando o alejando la herramienta de corte de la mesa. El de la derecha incrementa las revoluciones por minuto del motor de la fresadora.

3. Seta de emergencia. Al ser pulsada el motor de corte manteniéndolo apagado hasta desbloquear la seta de nuevo.

Conociendo las funciones de control numérico de activación del motor y selección de sentido del giro M5, M3 y M4 se pueden emplear los pines especificados de Arduino para controlar el motor de la máquina totalmente de forma automática. Por los botones y pulsadores que se han mencionado anteriormente circula una tensión de 220V pero Arduino solo maneja 5V como máximo y esto se traduce a un problema de incompatibilidad de potencia en la señal de control. Para remediar este problema se han utilizado relés.

Se ha seleccionado un módulo de dos canales compatible con Arduino. Cada canal es controlado por una entrada TTL, la cual puede ser fácilmente controlada por el Arduino. (Ver Fig. 3.65)

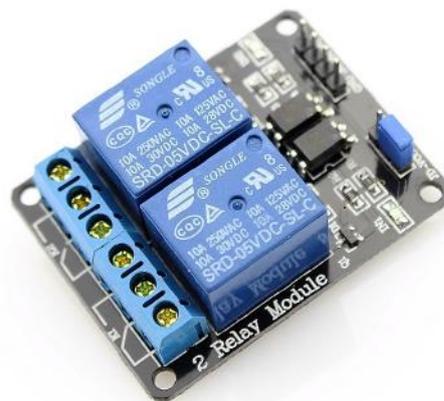


Figura 3.65: Relés controladores del motor

Para su alimentación y consumo la forma más segura es remover el jumper y alimentar la placa de relés con dos fuentes: la de la placa Arduino conectada a Vcc y una segunda fuente, con el positivo a JD-Vcc y el negativo a GND, sin estar éste unido a la placa Arduino. Esta conexión tiene como ventajas:

- Hay completa aislación entre la carga y el Arduino.
- Todo el consumo de los relés es tomado de la segunda fuente y no del Arduino o el puerto USB.

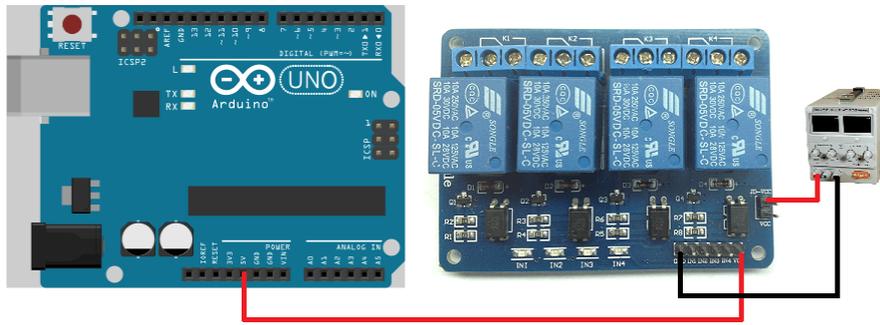


Figura 3.66: Alimentación con dos fuentes

Las entradas a la placa puede conectarse directamente a las salidas digitales de la placa Arduino (Ver Fig. 3.66). La única precaución a tener en cuenta es que cuando Arduino arranca al ser alimentado, los pines se configuran como entradas automáticamente y puede ocurrir que, por un brevísimo lapso de tiempo entre el arranque y la correcta configuración de estos pines como salidas, las entradas de control al módulo de relé queden en un estado indeterminado. Esto se puede evitar conectando en cada entrada un pull-up con una resistencia de 10K a Vcc, lo que asegura un estado ALTO durante el arranque.

Los relés sustituirán la función que tenían los antiguos pulsadores y el botón, haciendo posible activar el motor mediante los comandos correspondientes en el programa.

## 3.7. Instalación y configuración del software

Esta sección estará dedicada a documentar todos los pasos necesarios a seguir para instalar y configurar tanto el sistema OS de la Raspberry Pi como el listado de todos los comandos para preparar los programas imprescindibles para el manejo de una fresadora.

También se hará mención de Arduino y como realizar una correcta instalación del firmware con todos los pasos explicados uno a uno.

### 3.7.1. Programación de la Raspberry Pi

Para poder ejecutar todo el software en la Raspberry Pi, se instalará el sistema operativo Raspbian. Raspbian es una distribución del sistema operativo GNU/Linux y por lo tanto libre basado en Debian Wheezy para la placa computadora Raspberry Pi.

Lo primero que se debe hacer es descargar una imagen ISO de la distribución, que puede hacerse de forma gratuita en la página oficial.

Una la ISO descargada en nuestro PC, se copiará la ISO a la tarjeta de memoria SD, pero formateándola de forma que sea booteable.

- Si se trabaja en Windows puede hacerse de forma fácil usando el programa Win32DiskImage o similares.
- En caso de trabajar en Linux el proceso se debería poder realizar sin problema con Startup Disk Creator o similares.

Una vez que el proceso anterior ha terminado, simplemente se introduce la tarjeta en nuestro Raspberry PI y se conecta (basta con enchufarla a la corriente eléctrica). Si se usa una pantalla y se dispone de teclado y ratón, puede hacerse todo desde la misma Raspberry, pero si no se dispone de estos elementos tendrá que hacerse una conexión vía SSH (conectados con un cable de red al router) desde cualquier equipo. Ahora lo que se hace es ejecutar el comando `raspi-config` con permisos de `sudo` es decir:

```
sudo raspi-config
```

Este comando nos desplegará un menú en consola con distintas opciones.

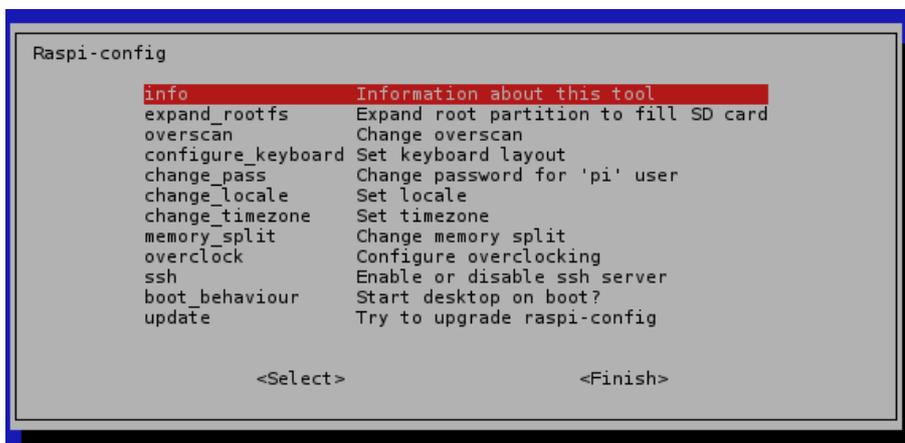


Figura 3.67: Menú principal de configuración de la Raspberry

La imagen está preparada para utilizar cualquier dispositivo de al menos 4Gb. El primer paso consiste en expandir el filesystem para que ocupe toda la capacidad de la tarjeta SD. Es obligatorio en nuestro caso extender la partición root (para usar todo el espacio de nuestra SD) ya es preciso aprovechar toda la memoria posible para instalar todo el software que se necesitará.

Conveniente cambiar la contraseña o quitarla, configurar el layout del teclado a español y la zona horaria pero es algo opcional y se puede hacer una vez iniciado el entorno gráfico.

Una vez terminados todos estos pasos nuestra Raspberry Pi estará lista para reiniciar y ejecutar el entorno gráfico.

El siguiente paso después de reiniciar y abrir la ventana de comandos para empezar a instalar paquetes imprescindibles.

En primer lugar se tendrá que actualizar la lista de paquetes disponibles y sus paquetes mediante el comando:

```
apt-get update
```

A continuación se actualizarán todos los programas mediante:

```
apt-get upgrade
```

Una vez actualizados todos los programas se comprobará la versión del kernel de la Raspberry Pi:

```
uname -r
```

Puede ser que el kernel sea una versión muy antigua. Es recomendable actualizar el kernel ya que trae mejoras como gestión de energía y soporte actualizado para los puertos GPIO entre otras cosas. Para actualizar el kernel se ejecutará el siguiente comando:

```
sudo rpi-update
```

Ahora se instalará bCNC, para ello se precisa de Internet para entrar al repositorio de Github y descargarnos el Zip.

Para ejecutar el software una vez descomprimido el archivo, solo bastaría con hacer clic en el icono de bCNC. Cuando se abre un recuadro que te pregunta el modo de inicialización se recomienda seleccionar 'Ejecutar desde el terminal' la primera vez que se ejecute por si sucediera algún problema.

Al ser un software escrito en Python todas las bibliotecas necesarias para ejecutarlo deberían de venir ya instaladas con la imagen del sistema.

En el caso que no se iniciara bCNC y diera algún error de serie habrá que actualizar manualmente PySerial con el siguiente comando:

```
sudo apt-get install pip
```

Seguido de,

```
sudo pip install pyserial --upgrade
```

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get upgrade
```

Por último se va a instalar el IDE de Arduino en la Raspberry Pi ya que es un entorno muy útil y se podrá cargar el firmware Grbl al Arduino directamente desde la misma Raspberry.

El comando a ejecutar para instalar Arduino es:

```
sudo apt-get install Arduino
```

Este es el último paso de la programación de la Raspberry Pi.

### 3.7.2. Programación de Arduino Uno

La versión de Grbl que se ha instalado en Arduino es la v0.9i.

Antes de cargar el código a la tarjeta hay que acceder a la configuración de Grbl para cambiar algunos parámetros importantes. Uno de los parámetros más importantes es cambiar la configuración de activación del motor, ya que como el motor de la fresadora no tiene variador de velocidad, hay que entrar en el archivo config.h y comentar la siguiente línea:

```
# define VARIABLE_SPINDLE // Default enabled. Comment to disable.
```

Para comentar esta línea solo basta con introducir antes de la almohadilla '//'.  
'//'.  
'//'.

La configuración de los pines de Arduino quedaría configurada como en la siguiente imagen:

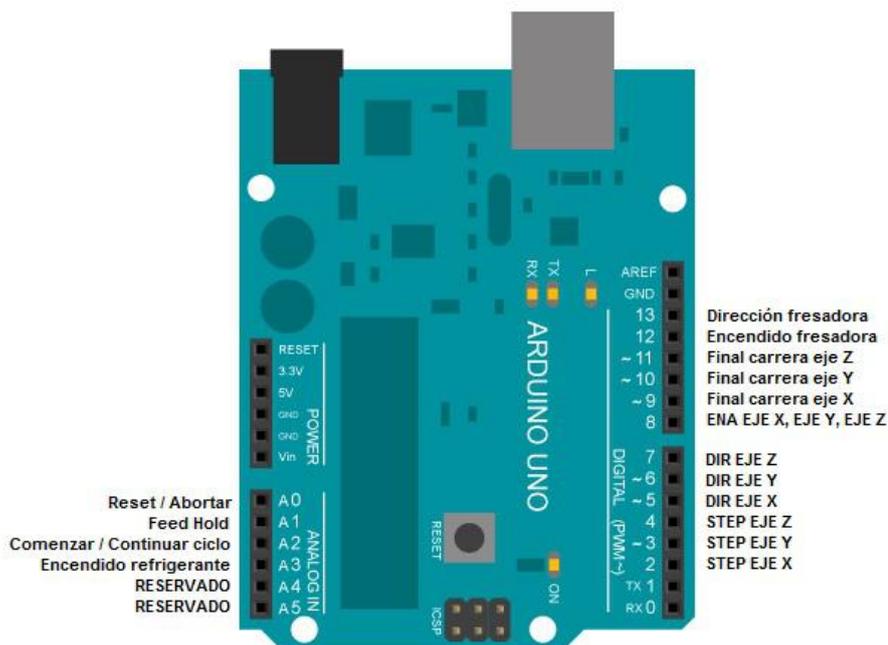


Figura 3.68: Configuración pines Arduino

Arduino se comunica con los controladores mediante el envío de señales a través de los pines DIR, STEP y ENABLE.

El puerto ENABLE es común para los tres controladores y es importante que estén conectados al pin 8 para evitar la constante carga de corriente en los motores, de este modo, en el momento que no estén trabajando ninguno de los motores se les cortara el suministro de corriente quedando estos desbloqueados.

Como se puede apreciar, los controladores disponen de señales STEP, DIR y ENABLE. Es importante destacar que los pines de ENABLE de todos los controladores son comunes y se conectan al pin 8 de Arduino.

Se va a realizar la instalación del código haciendo uso del IDE de Arduino. Una vez descargado y configurado Grbl está todo listo para cargar el archivo al microcontrolador. En primer lugar hay que asegurarse de estar utilizando la versión más reciente del IDE de Arduino.

Para cargarlo hay que incluir el archivo al IDE como si fuera una biblioteca, para ello:

- Poner en marcha el IDE de Arduino.
- hacer click en /Programa/Incluir librería/Añadir librería Zip.

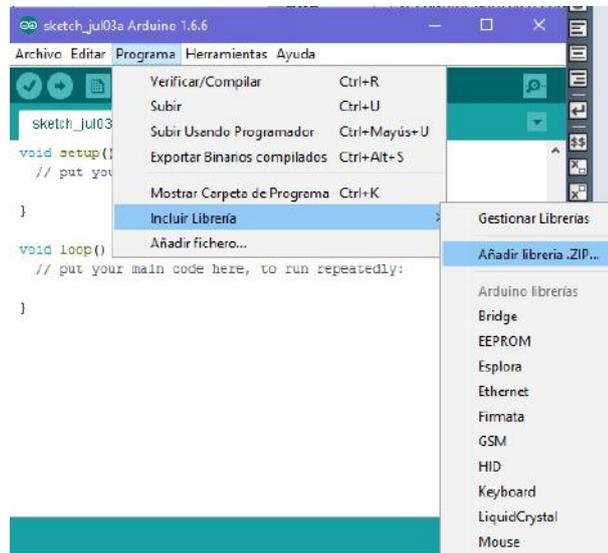


Figura 3.69: Importar librería Zip

- Seleccione la carpeta llamada 'Grbl' que se encuentra dentro de la carpeta descomprimida 'Grbl-master'. La carpeta correcta solamente contiene los archivos de origen y un directorio de ejemplo. (Ver Fig. 3.70)

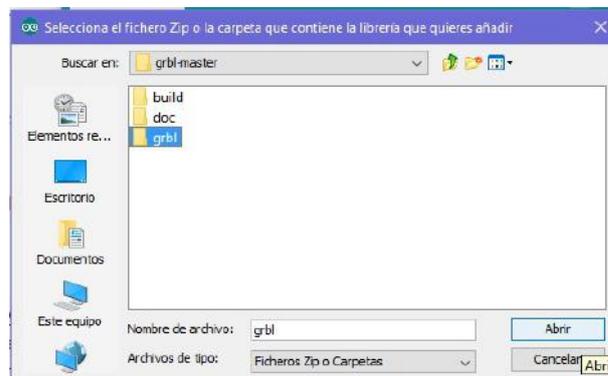


Figura 3.70: Seleccionando la carpeta Grbl

Abrir el ejemplo GrblUpload en Arduino.

- Para cargar el código hay que hacer clic en 'Archivo/Ejemplos/Grbl/GrblUpload'. (Ver Fig. 3.71)

Lo único que quedaría por hacer es cargar el código al Arduino estando éste conectado por el puerto serie.

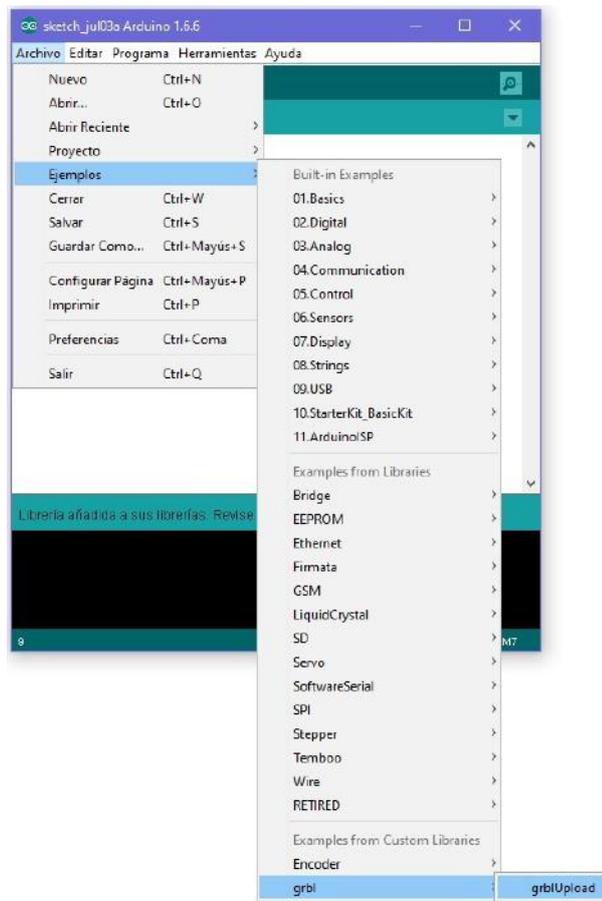


Figura 3.71: Cargando en el IDE el archivo generado

### 3.7.3. Configuración Grbl

Después de tener ya montado y cableado todo el armario de control, y por otro lado, tener instalado todo el software de control se pasará a configurar todo lo necesario para la puesta en marcha. No todos los parámetros que hay que modificar son universales ya que en cada máquina cambian muchos de estos dependiendo el tipo de arquitectura que siguen, si tienen husillos o correas, dimensiones,...etc.

Lo primero que se va a hacer es abrir el programa haciendo clic en el archivo bCNC.bat. Hay que ejecutarlo en la consola y el programa se empezará a compilar hasta abrir su menú principal.

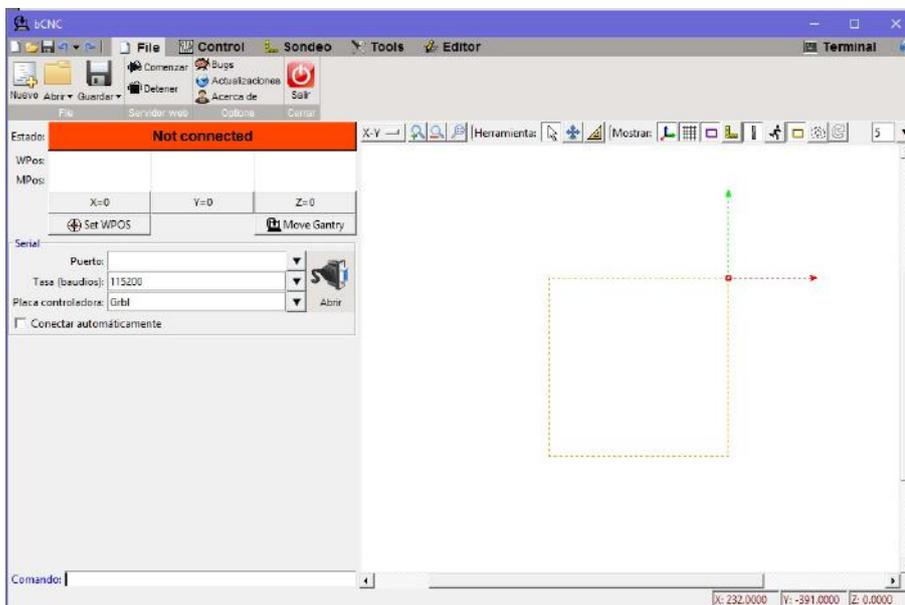


Figura 3.72: Menú principal bCNC

Como se ve a primera vista el estado del controlador al iniciar es 'Not connected', lo que indica que la conexión entre el software y Grbl aun no se ha establecido. Para iniciar la configuración primero se irá a la pestaña 'File' donde deberá aparecer el puerto serial asignado al Arduino cuando detecta Grbl. Si no hay ningún problema se pulsa en abrir y debería de establecerse la conexión de inmediato pasando el estado a 'Connected'. Una vez establecida la conexión, hay que acceder a la configuración de Grbl haciendo uso del terminal del programa que se encuentra arriba a la derecha de la ventana.

---

\$\$ (Ver la configuración de Grbl)

\$# (Ver los parámetros del #)  
 \$G (Ver estado)  
 \$I (Compilación)  
 \$N (Ver bloques de inicio)  
 \$X= valor (guardar la configuración de Grbl)  
 \$X (Desbloquear Grbl)  
 \$Nx= línea (Guardar bloque de inicio)  
 \$C (Comprobar G-code)  
 \$H (Realizar un homing)  
 ~ (Inicio del ciclo)  
 ! (Retención de alimentación)  
 ? (Estado actual)  
 Ctrl-x (reajustar Grbl)

---

El terminal nos muestra arriba a en la parte izquierda un acceso directo a los comandos más importantes que pueden escribirse en la consola. De esta lista nos interesa el primer comando que es el que nos permitirá cambiar parámetros que son únicos en nuestra máquina. La incorrecta configuración de uno de ellos puede hacer que el sistema no funcione, presente un funcionamiento incorrecto o funcione con cotas de errores muy elevadas.

Se introducirá el comando \$\$ para entrar en la configuración y se establecerán estos parámetros:

---

\$0=10 (step pulse, usec)  
 \$1=25 (step idle delay, msec)  
 \$2=0 (step port invert mask: 00000000)  
 \$3=0 (dir por invert mask: 00000110)  
 \$4=1 (step enable invert, bool)  
 \$5=0 (limit pins invert, bool)  
 \$6=0 (probe pin invert, bool)  
 \$10=3 (ststus report mask: 00000011)  
 \$11=0.020 (juntion derivation, mm)  
 \$12=0.002 (arc tolerance, mm)  
 \$13=0 (report inches, bool)  
 \$20=0 (soft limits, bool)  
 \$21=0 (hard limits, bool)  
 \$22=1 (homing cycle, bool)  
 \$23=3 (homing dir invert mask: 00000001)  
 \$24=25.00 (homing feed, mm/min)

\$25=500.00 (homing seek, mm/min)  
\$26=250 (homing debounce, msec)  
\$27=10.000 (homing pull-off, mm)  
\$100=320 (X, step/mm)  
\$101=320 (Y, step/mm)  
\$102=320 (Z, step/mm)  
\$110=6000.000 (X max rate, mm/mim)  
\$111=6000.000 (Y max rate, mm/mim)  
\$112=6000.000 (Z max rate, mm/mim)  
\$120=30.000 (X accel, mm/sec2)  
\$121=30.000 (Y accel, mm/sec2)  
\$122=30.000 (Z accel, mm/sec2)  
\$130=400.000 (X max travel, mm)  
\$131=200.000 (Y max travel, mm)  
\$132=8.000 (Z max travel, mm)

---

Los pasos a seguir para cambiar cada uno de estos parámetros son muy sencillos, por ejemplo si quieres modificar el \$0 y cambiarlo a 20 solo tienes que escribir el siguiente comando:

$$\$0 = 20$$

De este modo se irán cambiado cada uno de los parámetros que vienen por defecto por el que le corresponde a nuestra máquina.

Desde la pestaña 'File' se puede crear un archivo G-code nuevo, cargar un código ya creado o guardar uno que se haya modificado.

Aquí hay una opción muy interesante que es la de crear un servidor web para poder realizar el control de nuestra máquina desde cualquier sitio incluso con dispositivos móviles o tabletas.

Para iniciar este servidor web es necesario que la Raspberry este conectada a Internet o a una red local y para lanzar el servidor solo hay que hacer clic en comenzar y acto seguido si no ha sucedido ningún problema saltará un mensaje confirmando que la acción se ha llevado a cabo correctamente.

Una vez iniciado el servidor puede probarse su funcionamiento obteniendo la 'IP' y el puerto que le fueron asignadas a la Raspberry Pi. La IP puede consultarse en Internet y el puerto te lo asigna el mismo bCNC. Conocidas ambas se introduce en una nueva pagina de Internet la combinación de la forma correcta, como por ejemplo:

$$192.168.1.33:8080$$



Figura 3.73: Servidor web

Donde la IP sería '192.168.1.33' y el puerto '8080'.

En esta fresadora se ha hecho la prueba del control mediante un dispositivo móvil, conectándonos tanto el teléfono como la Raspberry a la misma red local. Los resultados que se han obtenido con esta prueba son generalmente buenos ya que la respuesta de la máquina cuando se le envía una acción a realizar es bastante rápida.



Figura 3.74: Visualización del servidor

# Capítulo 4

## Verificación y pruebas de funcionamiento

La importancia dimensional en cuanto a la geometría de las piezas que se realizan en las máquinas herramienta de control numérico nos lleva en este capítulo a verificar la exactitud de desplazamiento de los ejes de la fresadora, con lo que se obtendrá una serie de datos referidos a los errores que arrastra en los desplazamientos de cada uno de ellos. Después de hacer un análisis práctico para el cálculo del error de cada eje, se realizará una prueba de mecanizado, con el fin de comprobar la resolución que es capaz de alcanzar la fresadora con este nuevo sistema de control instalado.

### 4.1. Verificación

En esta sección se ha realizado un estudio de uno de los aspectos más importantes del sistema de control de una máquina de control numérico, su precisión y repetibilidad en el posicionamiento. Hoy en día las exigencias de precisión a la hora de mecanizar una pieza pueden llegar a ser muy altas. Las máquinas herramienta de control numérico ofrecen mayor precisión en comparación con las máquinas convencionales. Más aún, como las máquinas están controladas por software, los procesos se terminan antes y con menos errores, lo que resulta una mejora de productividad.

#### 4.1.1. Tipo de errores

Los errores que suelen afectar a las máquinas de control numérico pueden ser tanto mecánicos como electrónicos. Estos errores se pueden acotar en dos

principalmente: el juego de los husillos y la pérdida de pasos.

#### 4.1.1.1. Juego

Cuando se habla de juego de los husillos en el ámbito de las máquinas por control numérico, conocido como *Backlash* en inglés, nos estamos refiriendo a una holgura que se produce durante una reversión del eje. El juego en los ejes X e Y de los centros de mecanizado son más evidentes en el fresado de círculos completos. Si existe alguna reacción violenta, habrá una marca de referencia a lo largo de el recorrido de la cara del círculo. Los juegos en los husillos se pueden causar por el uso habitual de la máquina debido al desgaste. En nuestra fresadora la posibilidad que los husillos tengan holgura es bastante elevada ya que ha estado en uso durante 18 años.

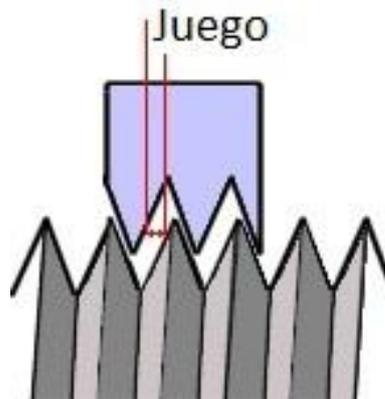


Figura 4.1: Juego producido en un husillo convencional

Puede realizarse una compensación del juego mediante software, como lo contemplan Mach3 o LinuxCNC entre otros. Una vez parametrizado el juego del husillo, el software trata de añadir el error de la holgura de inversión que tiene cada eje.

Por el momento la versión más actual de Grbl no tiene soporte para eliminar el juego del husillo mediante código, pero actualmente se está trabajando para que en la siguiente distribución de Grbl cuente con la compensación para las máquinas de control numérico sin comprometer la precisión de las mismas.

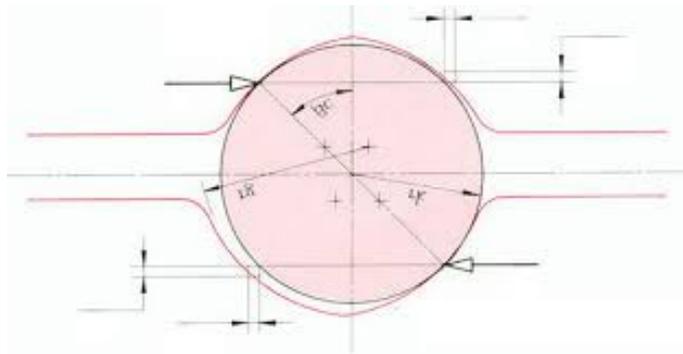


Figura 4.2: Backlash producido en un husillo de bolas

#### 4.1.1.2. Pérdida de pasos

La pérdida de pasos es un fallo de control de un motor paso a paso que ocasiona que éste, no realice todos los movimientos de paso que se le han enviado desde el controlador. Puede venir ocasionado por un mal ajuste de los valores de voltaje y corriente de control, por una mala elección del motor (con poco par motor) o por un bloqueo en el sistema de movimiento. La pérdida de pasos también puede ser ocasionada por el mal ajuste de la configuración de algunos parámetros de Grbl, como la velocidad máxima del motor y la rampa de aceleración del mismo. Si se ajusta una velocidad más alta de la que el motor soporta, puede empezar a vibrar y a moverse mal, una señal de pérdida de pasos. La forma con la que se acelera el motor es también muy importante, ya que se acelera poco a poco la velocidad es mayor que si la aceleración es brusca. La aceleración debe de ajustarse correctamente y sin excedernos demasiado ya que se produce una pérdida de pasos desde el punto de reposo a cuando alcanza la velocidad establecida.

#### 4.1.2. Procedimiento

En esta sección se realizarán unas pruebas preliminares de precisión en en sus movimientos de la mesa en los ejes X e Y, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control a través de la medición de unos patrones con una dimensión conocida. Para la medición se hará uso de un palpador 3D colocado en el mandrino de la fresadora. Se trata del palpador GARANT 35 9500, caracterizado por una gran precisión y linealidad por lo que es adecuado para la medición de piezas de trabajo. Cuenta con un indicador de lectura combinado: el indicador digital por un lado informa del valor de medición exacto y por otro lado las barras gráficas nos dan la información dinámica del recorrido. El intervalo de trabajo de este instru-

mento es muy amplio siendo un máximo de 7mm en todas las direcciones (x, y, z). El punto de rotura es nominal, ya que la punta de palpado cuenta con una resistencia cerámica, la cual si es excedido el intervalo máximo de trabajo romperá por dicha resistencia. Es un instrumento de medición preciso para las fresadoras y máquinas de erosión, utilizado para determinar el cero pieza, medición de longitudes, centros y cantos de referencia. (Ver Fig. 4.3)



Figura 4.3: Palpador digital Garant

Los ensayos realizados con este instrumento consisten en la medición de longitud en diversos puntos de la mesa de la máquina, utilizando diferentes patrones de longitudinales de alta precisión fabricados en acero, con un intervalo de incertidumbre de medida de  $\pm 0,050mm$ , disponibles en el laboratorio de metrología del Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación de la Universidad Politécnica de Cartagena. Estas probetas tienen unas dimensiones de: 20, 60 y 100mm. Los ensayos se realizarán a velocidades de avance diferentes con la finalidad de establecer un gráfico de error en el que se incluye la distancia recorrida con respecto a la velocidad. Los movimientos de palpado se realizaran mediante un avance activo, el definido para el mecanizado. El avance de palpado puede ser seleccionado por el programa

mediante F, manteniéndose activo mientras no se programe otro valor.

### 4.1.3. Ensayos realizados

Se van a ejecutar estos ensayos con un orden tanto de posición de la pieza en la mesa como de velocidad de aplicación de recorridos. Se realizarán tres ensayos a tres velocidades distintas por patrón y colocación en la mesa. Para iniciar la rutina de ensayos se colocará el patrón en un amarre dejándolo "totalmente" horizontal. Como las medidas que se van a realizar son respecto al eje X e Y, el hecho de estar desajustada horizontalmente unas micras, influirá en un error despreciable a la hora de tomar la medida final.

Cuando está colocado el patrón, se debe aproximar la punta del palpador a la superficie del patrón hasta dejar el indicador digital del instrumento a cero, este punto será nuestra WPos Z=0. Del mismo modo se aproximará la punta del palpador al lateral izquierdo y se acercará a la cara del patrón hasta dejar el indicador digital del instrumento a cero, este punto será nuestro WPos X=0. Con el fin de sistematizar el proceso de medida, se ha programado un ciclo de palpación que realiza la aproximación para el contacto a una velocidad de avance constante de 30 mm/min. En el momento que haga contacto se dará por finalizado el bloque, asumiendo y comparando la posición teórica de los ejes con la posición real marcada por el instrumento en ese instante. La diferencia de estas posiciones nos dará el error de cada ciclo. Se denomina error de medición a la diferencia entre la cota programada y la cota alcanzada con el palpador.



Figura 4.4: Posición inicial y final de palpado

La velocidad con la que se realizarán los tres ensayos estará establecida

134 **CAPÍTULO 4. VERIFICACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

en un orden incremental, empezando desde la más baja a la más alta. Estas velocidades serán: F100, F3000, F6000.

---

G1 X-10 F100  
 G0 Z10  
 G1 X110 F100  
 G0 Z-5  
 G1 X100 F30  
 M30

---

**4.1.3.1. Resultados**

1. EJE X

Para las distintas posiciones en la mesa en el eje X de todos los patrones disponibles se han obtenido una serie de datos que se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Tabla de errores obtenidos en el eje X

	20mm			60mm			100mm		
	F100	F3000	F6000	F100	F3000	F6000	F100	F3000	F6000
<b>Centro</b>									
<b>1</b>	-0,105	-0,120	-0,115	-0,100	-0,105	-0,100	-0,100	-0,110	-0,110
<b>2</b>	-0,105	-0,120	-0,115	-0,100	-0,110	-0,110	-0,105	-0,110	-0,115
<b>3</b>	-0,100	-0,120	-0,110	-0,100	-0,110	-0,110	-0,105	-0,110	-0,110
<b>M</b>	<b>-0,103</b>	<b>-0,120</b>	<b>-0,113</b>	<b>-0,100</b>	<b>-0,108</b>	<b>-0,106</b>	<b>-0,103</b>	<b>-0,110</b>	<b>-0,111</b>
<b>Izquierda</b>									
<b>1</b>	-0,105	-0,090	-0,105	-0,105	-0,095	-0,120	-0,100	-0,120	-0,115
<b>2</b>	-0,110	-0,090	-0,105	-0,100	-0,095	-0,115	-0,100	-0,115	-0,110
<b>3</b>	-0,105	-0,095	-0,105	-0,100	-0,100	-0,115	-0,105	-0,115	-0,115
<b>M</b>	<b>-0,106</b>	<b>-0,091</b>	<b>-0,105</b>	<b>-0,101</b>	<b>-0,096</b>	<b>-0,116</b>	<b>-0,101</b>	<b>-0,116</b>	<b>-0,113</b>
<b>Derecha</b>									
<b>1</b>	-0,105	-0,100	-0,115	-0,115	-0,115	-0,115	-0,100	-0,095	-0,125
<b>2</b>	-0,110	-0,100	-0,115	-0,100	-0,110	-0,115	-0,100	-0,100	-0,120
<b>3</b>	-0,110	-0,100	-0,120	-0,110	-0,115	-0,110	-0,105	-0,105	-0,120
<b>M</b>	<b>-0,108</b>	<b>-0,100</b>	<b>-0,116</b>	<b>-0,108</b>	<b>-0,113</b>	<b>-0,113</b>	<b>-0,101</b>	<b>-0,100</b>	<b>-0,121</b>

2. EJE Y

Respecto el eje Y se ha realizado el mismo estudio, tomando los datos de medición reales que nos proporciona el palpador y compararlos con el recorrido teórico para hallar el error. Para las distintas posiciones en

la mesa de todos los patrones, se han obtenido una serie de datos que se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Tabla de errores obtenidos en el eje Y

	20mm			60mm			100mm		
	F100	F3000	F6000	F100	F3000	F6000	F100	F3000	F6000
<b>Centro</b>									
<b>1</b>	-0,210	-0,215	-0,225	-0,220	-0,215	-0,225	-0,210	-0,215	-0,225
<b>2</b>	-0,210	-0,215	-0,220	-0,210	-0,215	-0,225	-0,210	-0,215	-0,220
<b>3</b>	-0,210	-0,220	-0,220	-0,210	-0,210	-0,225	-0,210	-0,220	-0,220
<b>M</b>	<b>-0,210</b>	<b>-0,216</b>	<b>-0,218</b>	<b>-0,213</b>	<b>-0,213</b>	<b>-0,225</b>	<b>-0,210</b>	<b>-0,216</b>	<b>-0,218</b>
<b>Izquierda</b>									
<b>1</b>	-0,195	-0,200	-0,205	-0,190	-0,195	-0,210	-0,205	-0,210	-0,210
<b>2</b>	-0,205	-0,205	-0,200	-0,195	-0,195	-0,210	-0,200	-0,205	-0,210
<b>3</b>	-0,205	-0,205	-0,205	-0,195	-0,200	-0,205	-0,185	-0,205	-0,215
<b>M</b>	<b>-0,201</b>	<b>-0,203</b>	<b>-0,203</b>	<b>-0,193</b>	<b>-0,196</b>	<b>-0,208</b>	<b>-0,196</b>	<b>-0,206</b>	<b>-0,211</b>
<b>Derecha</b>									
<b>1</b>	-0,210	-0,215	-0,225	-0,190	-0,205	-0,220	-0,200	-0,195	-0,215
<b>2</b>	-0,210	-0,215	-0,220	-0,205	-0,210	-0,215	-0,200	-0,195	-0,200
<b>3</b>	-0,210	-0,210	-0,220	-0,195	-0,220	-0,215	-0,200	-0,190	-0,205
<b>M</b>	<b>-0,210</b>	<b>-0,213</b>	<b>-0,221</b>	<b>-0,196</b>	<b>-0,211</b>	<b>-0,216</b>	<b>-0,200</b>	<b>-0,193</b>	<b>-0,206</b>

En consecuencia a los datos obtenidos de cada uno de los ejes de movimiento horizontal, se han realizado unos gráficos para hacer un análisis más detallado y poder conocer el origen de los errores. Cabe destacar que no se han tenido en cuenta en la medición de estos errores las incertidumbres de los patrones ni del instrumento de medida.

Para el primer gráfico se han realizado las medias del error cometido en la medición de cada patrón individual a las diferentes velocidades a las que se ha sometido el eje de desplazamiento. Hay un total de dos gráficos, el que representa el error en el eje X y el que lo representa en el eje Y.

En la figura 4.5, que muestra la media de los errores del eje X, se puede apreciar la proximidad que existe entre las tres líneas representativas del error medio en función de la velocidad. La variación de este error se puede acotar en un rango medio entre 0,101 y 0,117mm, siendo el recorrido de 0,016mm, un valor muy aceptable. Se puede deducir de los datos analizados que ese error es el producido por el sistema de control. Por otro lado existe un error de medida más grande que tienen en común todos estos valores y que se descarta la opción de ser producido por el sistema de control, ya que para todos los ensayos realizados con los patrones colocados en cualquier coordenada de la mesa se ha producido del mismo modo. El error medio aproximado es de

0,1mm. Se puede concluir que este error invariable es producido por el juego de los husillos, y por tanto es un error mecánico debido a los años de trabajo de la fresadora.

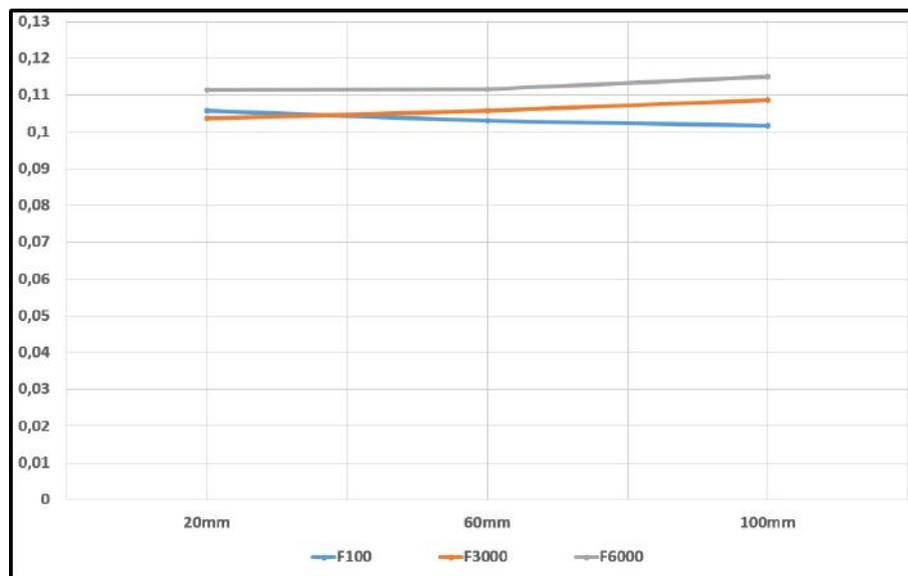


Figura 4.5: Representación del error del eje X a diferentes avances

En lo que respecta al eje Y, en la figura 4.6 pasa exactamente lo mismo. Existe una gran proximidad entre las líneas del error medio, por tanto, la acotación del error del eje Y esta establecida en el rango 0,2006 y 0,216mm, siendo el recorrido de 0,0154mm. Si se hace la comparación, el error producido por el sistema de control en ambos ejes es exactamente el mismo. El error más grave en este eje es, al igual que en el eje X, es mecánico, ya que el error medio aproximado es de 0,2mm, un error que duplica al del eje X. A la conclusión a la que se llega con estos datos es que también existe en este eje un error mecánico invariable debido también al juego de los husillos.

Por conclusión final queda por aclarado que el error más notable generado en la fresadora es puramente mecánico, llegando a doblarse en el eje Y. Se ha comprobado al mismo tiempo la efectividad de este sistema de control que produce un error casi despreciable incluso a la máxima velocidad que nos permite. A continuación se realizará el proceso de mecanizado de una pieza con superficies tridimensionales complejas.

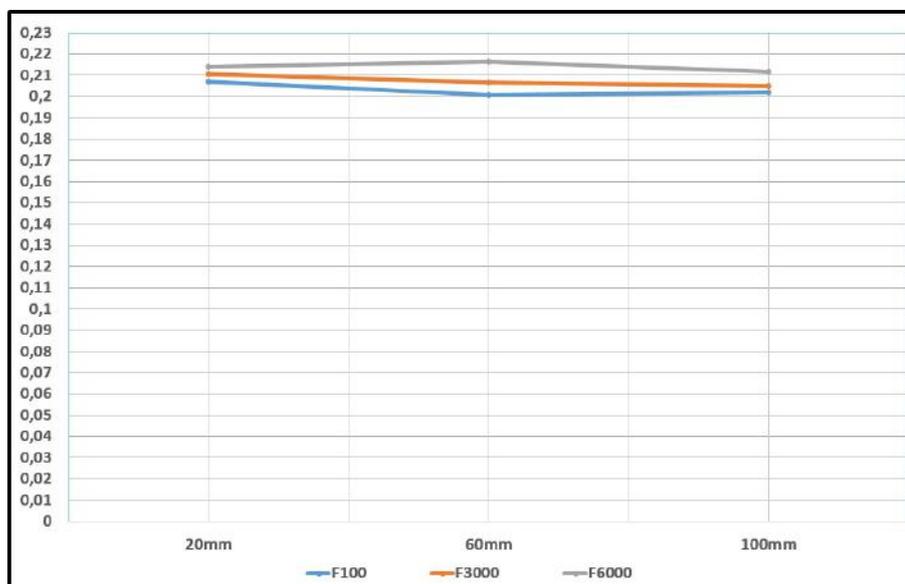


Figura 4.6: Representación del error del eje Y a diferentes avances

## 4.2. Pruebas de funcionamiento

No se puede dar por concluido este proyecto sin antes comprobar el comportamiento de la máquina ante un ejemplo de mecanizado real. Aquí es donde verdad se pone a prueba todo el conjunto de control, verificando que la configuración de los parámetros de la fresadora conlleven a una precisión adecuada y unos suaves movimientos de los ejes de trabajo. Antes de empezar, por cuestión de seguridad, es necesario tener desconectado el interruptor del armario eléctrico. Se conectará una vez dentro del programa bCNC y se establezca la conexión con el controlador Arduino.

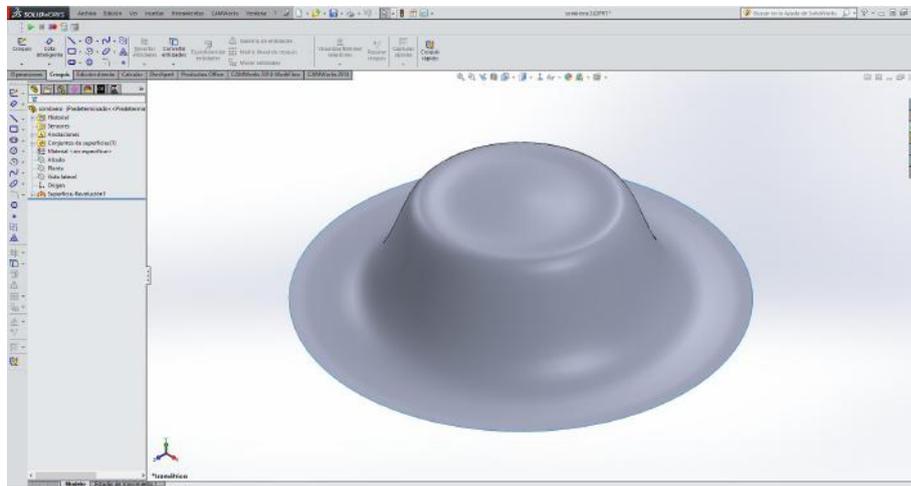


Figura 4.7: Figura de prueba a mecanizar

Una vez todo conectado, se procederá a seleccionar el modelo a mecanizar. Dado que se van a realizar las primeras pruebas se va a trabajar con un material seguro como lo son las resinas de mecanizado, ya que estas cuentan con una baja abrasión y permite la realización de relieves y prototipos con unos detalles de alta calidad.

El diseño es un sombrero creado a partir de un perfil al que se le ha hecho una revolución entorno al eje central.

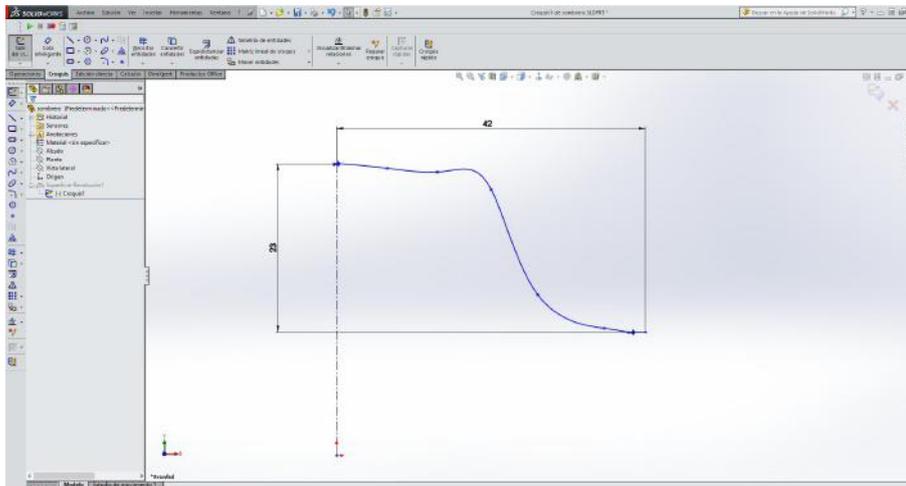


Figura 4.8: Perfil del diseño

Se ha realizado el diseño del sólido mediante el entorno de Solidworks, el cual se ha estado utilizando para realizar los modelos de todo el proyecto gracias a su gran sencillez para elaborarlos y altas prestaciones para la ingeniería. Solidworks se convierte en una herramienta muy potente si se integra junto CamWorks, por la posibilidad de poder diseñar cualquier modelo y aplicarle después las correspondientes operaciones CAM. Entre los módulos que tiene este software están los tornos, fresadora, máquinas multi-ejes y maquinado de alta velocidad.

Para mecanizar el modelo se utilizará la fresadora de tres ejes, y configurarán a continuación todos los parámetros de mecanizado necesarios. El fresado de la pieza se hará en dos operaciones en el que se utilizara una fresa esférica de 10mm, tanto para el desbaste como para el acabado final.

Los parámetros de mecanizado para la primera operación, el desbaste, se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros de mecanizado para el desbaste

<b>Herramienta</b>	Esférica de 10 mm
<b>Velocidad</b>	1500 rpm
<b>Avance</b>	500 mm/min
<b>Sobre espesor</b>	1,5 mm
<b>Desviación</b>	1 mm
<b>Profundidad</b>	2 mm

Los parámetros de mecanizado para la segunda operación, el acabado final, se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Parámetros de mecanizado para el acabado final

<b>Herramienta</b>	Esférica de 10 mm
<b>Velocidad</b>	1500 rpm
<b>Avance</b>	300 mm/min
<b>Desviación</b>	0,1 mm
<b>Profundidad</b>	0,5 mm
<b>Estrategia</b>	Espiral

El uso de CamWorks permite simular y verificar los caminos de la herramienta necesarios para el mecanizado.

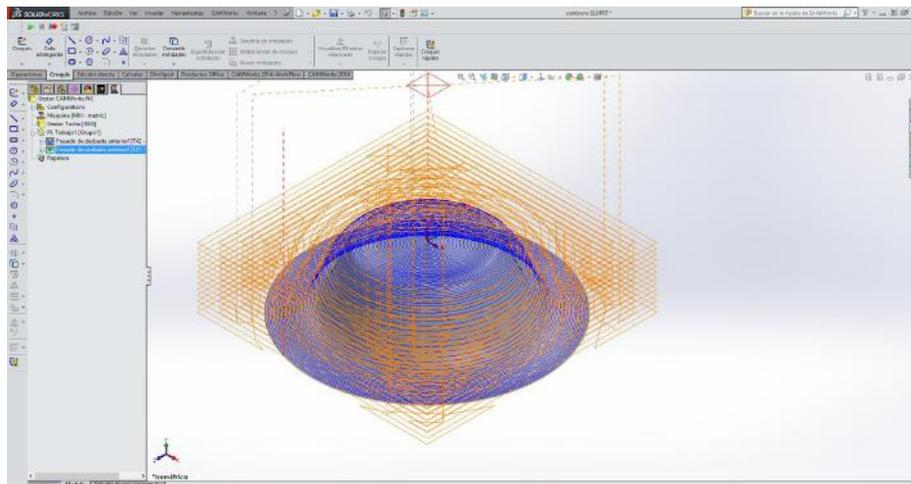


Figura 4.9: Caminos de herramienta generados por CamWorks

En la figura 4.9 se ve como se generan las dos operaciones de mecanizado, en naranja la operación de desbaste y en azul la pasada de acabado final. El origen de coordenadas donde comenzará la fresadora con el desbaste se ha situado en el centro del modelo, en la parte superior.

El material escogido para la prueba de mecanizado es una resina de mecanizado de alta densidad. Se partirá de un material bruto de 150x150 y 50mm de espesor. Será fijado en el centro de la mesa de la máquina con dos amarres laterales. Al ser un material blando no presentará muchos esfuerzos frente a la herramienta de corte. Al ser un modelo con geometría circular, como medida de seguridad, se ha marcado el centro del mismo sobre el material y

realizado el contorno a lápiz para asegurarnos que los amarres se colocan a suficiente distancia como para que no colisione la fresa durante el mecanizado.

Preparado para comenzar el proceso, hay que asignar unas coordenadas iniciales de la posición trabajo (WPos), para ello y de forma manual, se lleva el extremo de la herramienta al centro dibujado del modelo sobre la superficie del bruto, procurando que la herramienta este rozando esta superficie. Ya colocada se le asignará esa posición como WPos=0 en todos los ejes cartesianos de la fresadora, haciéndola coincidir con el cero utilizado en el CAM. Terminado este paso, está todo listo para empezar con el programa, por lo que se hará clic en ejecutar el código.



Figura 4.10: Preparación del material bruto

La ejecución del G-code se realiza de forma correcta, activando el motor en el sentido de corte horario. El resultado del desbaste con la fresa de 10mm puede verse en la siguiente imagen:

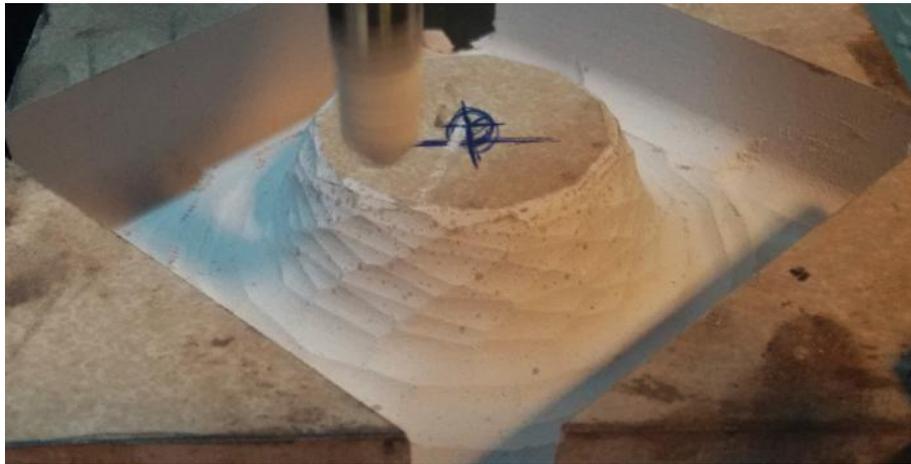


Figura 4.11: Desbaste con la fresa de 10mm

Terminado el proceso de desbaste, el programa procede con el acabado final ejecutando la estrategia espiral desde la superficie. Al usar una misma herramienta para todas las operaciones, se ha evitado el tener que realizar el cambio de herramienta, que al carecer de un palpador de cambio de herramienta, habría que ajustar a mano la fresa para compensar la posible pérdida de distancia en Z respecto la pieza.

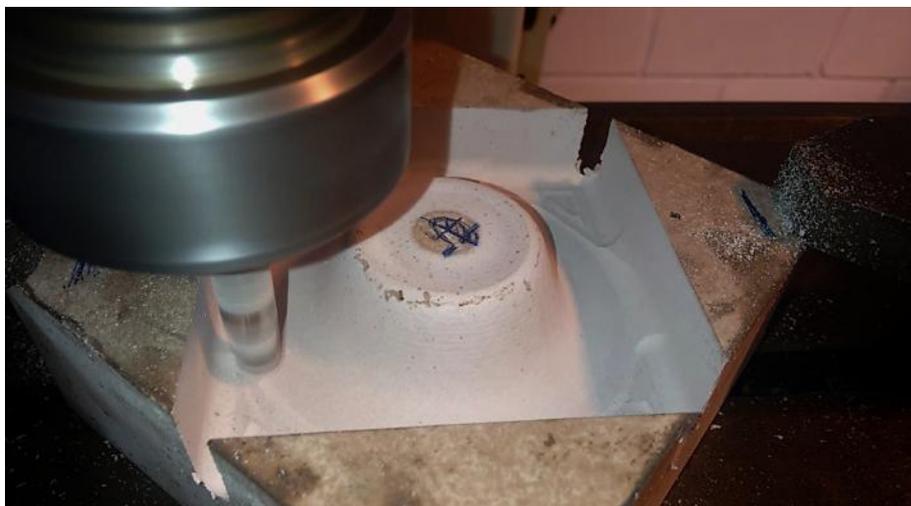


Figura 4.12: Proceso de acabado final con la fresa de 10mm

Cuando la fresadora termina con el proceso de acabado final desconecta todos los motores, se posiciona en unas coordenadas seguras y ya puede procederse a la retirada del modelo.

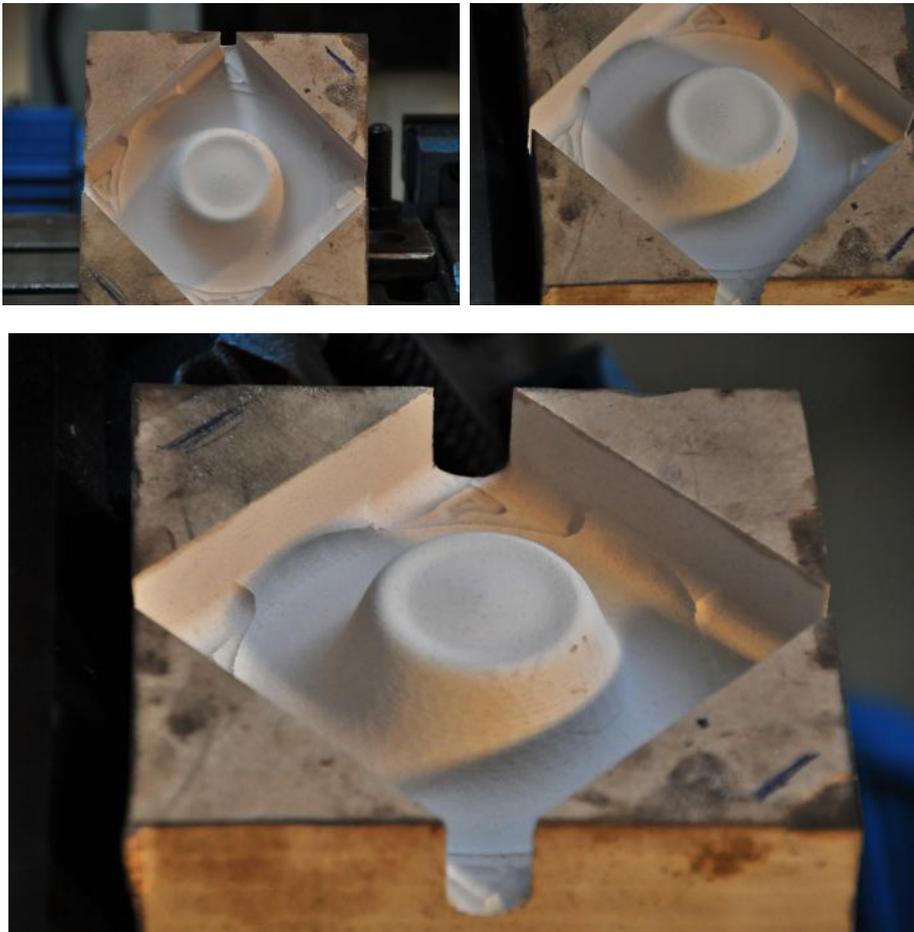


Figura 4.13: Acabado del mecanizado

Se obtiene como resultado una pieza bien acabada y sin presencia aparente de errores dimensionales por pérdida de pasos o por el efecto del juego de los husillos, recordando también que para la fabricación de esta pieza se ha programado una desviación de 0,1mm.



# Capítulo 5

## Memoria económica

### HARDWARE

Componente	Canidad	Proveedor	Precio	Total
Controladores	4	EBAY	81,33	325,32
Fuente conmutada 12-48V 720W	1	EBAY	139	139
Final de carrera	3	EBAY	1,49	4,47
Monitor	1	VIBBO	20	20
Raspberry Pi 2	1	AMAZON	41,31	41,31
Arduino Uno Rev.3	1	AMAZON	23,95	23,95
Ventilador 120mm	3	AMAZON	2,97	8,91
Convertidor HDMI-VGA	1	AMAZON	7,22	7,22
Tarjeta de memoria 8GB	1	AMAZON	4	4
USB montaje en panel	1	AMAZON	13,99	13,99
Mini teclado inalámbrico	1	AMAZON	18,99	18,99
Fuente de alimentación ATX 500W	1	AMAZON	14,85	14,85
Fuente alimentación Raspberry Pi	1	AMAZON	9,99	9,99
Módulo Relés 5V dos canales	1	AMAZON	4,25	4,25
Relés	3	AMAZON	3,03	9,09
				<b>645,34</b>

Gastos de envío	44,3
<b>TOTAL</b>	<b>689,64</b>

**CABLEADO**

<b>Componente</b>	<b>Canidad</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Precio</b>	<b>Total</b>
Cable apantallado	6	RAYTE	0,65	3,9
Terminales de onexión 0,5	20	RAYTE	0,1	2
Terminales de onexión 0,25 6mm	20	RAYTE	0,04	0,8
Tubo termoretráctil	3	RAYTE	0,5	1,5
Conectores h-h Arduino	2	RAYTE	0,6	1,2
Conectores h-m Arduino	1	RAYTE	0,6	0,6
Conectores h-h 90° Arduino	1	RAYTE	0,6	0,6
PCB borna 2 contactos	2	RAYTE	0,39	0,78
Resistencias 10K	6	RAYTE	0,07	0,42
Tarjeta perforada	1	RAYTE	4,71	4,71
				<b>16,51</b>

Gastos de envío	0
<b>TOTAL</b>	<b>16,51</b>

**MONTAJE**

<b>Componente</b>	<b>Canidad</b>	<b>Proveedor</b>	<b>Precio</b>	<b>Total</b>
Armario metálico 400x300x200	1	RS	83,70	83,70
Canaleta 25x50x1000	1	RS	12,96	12,96
Marcadores 0,2	1	RS	6,16	6,18
Tubo pvx flexible 25	8	FERRETERÍA	0,4	3,2
Tornillería	-	FERRETERÍA	-	2
				<b>108,04</b>

Gastos de envío	0
<b>TOTAL</b>	<b>108,04</b>

**TOTAL**

HARDWARE	689,64
CABLEADO	16,51
MONTAJE	108,04

<b>TOTAL</b>	<b>814.19</b>
--------------	---------------

# Capítulo 6

## Conclusiones

Llegados a este punto y justo antes de dar por acabado el proyecto hay que evaluar si el trabajo realizado ha sido satisfactorio, analizando si cumple con los objetivos y pautas que se dejaron claramente marcadas en un principio.

- Se ha construido un nuevo sistema de control numérico en lazo abierto, y se ha comprobado su comportamiento realizando ejemplos de mecanizado, con los resultados que se han podido observar anteriormente.
- Durante el tiempo que ha sido necesario emplear para la realización de este proyecto desde el inicio, se ha ido recogiendo todos los pasos y detalles en la memoria, incluyendo los problemas que hayan podido surgir durante todo el proceso y las soluciones que se han adoptado para enmendarlos.
- Se ha procedido a la realización de la mayor parte del proyecto in situ. Se ha realizado un estudio completo de la máquina con la intención de descubrir cuales son las limitaciones mecánicas de la misma, obteniendo los datos necesarios que nos han ayudado a la toma de decisiones a lo largo del tiempo. Pese a que es una máquina industrial preparada para soportar grandes esfuerzos, las condiciones en las que se encuentran algunos de sus componentes mecánicos, como lo son los engranajes de la caja de transmisión, han sufrido el peso de los años y al mecanizar, la temperatura de dicha caja tiende a subir siendo algo elevada, pero no comprometiendo la integridad del sistema.
- Se ha obtenido la mayor relación calidad/precio en todo lo que al proyecto se refiere, ya sea por la calidad de componentes empleados, montaje del sistema de control o calidad final que se obtiene con el mecanizado.

- Casi la totalidad de la metodología empleada en el proyecto se ha basado en el concepto '*Open Source*', lo que implica unos beneficios directos de la reducción considerable del presupuesto. Esto también se aplica al software, ya que en su totalidad sigue ésta metodología y puede accederse a su código fuente.
- Unos de los factores más importantes a la hora de la instalación de componentes es la organización de los mismos y la distribución del cableado, que permiten en un vistazo rápido identificar cada integrante del armario de control. Esto facilita las tareas de mantenimiento y supervisión en gran medida, al mismo tiempo que se obtiene un sistema más seguro.
- Se ha intentado aprovechar el máximo espacio disponible de la mesa, siendo acotado en un rango de  $X=400$ ,  $Y=200$ ,  $Z=80$ mm. Los errores dimensionales producidos por la electrónica de la máquina son del orden de "0.016" micras. El error mecánico producido por el juego de los husillos es de 0.2mm en el eje 'Y', unos 0.1mm en el eje 'X'.
- Respecto a la autonomía y seguridad, la fresadora puede dejarse mecanizando durante un extenso periodo de tiempo, pero los engranajes de la caja de transmisión sufren por la continua fricción que ha sido acentuada con el desgaste causado por el paso de los años.

En un futuro se pueden aplicar mejoras para hacer una evolución del sistema. A continuación se proponen algunas de estas mejoras:

- Una clara mejora es la inclusión de un cuarto eje. Se trata de un dispositivo compuesto de un plato de torno controlado por un motor paso a paso y un controlador adicional. Su función es la misma de un plato divisor convencional con la diferencia de que esta controlado por el CNC. La interpolación puede ser simultánea en los 4 ejes "X Y Z C". Esta mejora aumenta la versatilidad y el alcance en desarrollar trabajos con la fresadora.
- Sistema de aspiración de viruta. La implantación de un sistema de aspiración es para deshacernos del material sobrante del mecanizado. Su función no es solo la de mantener una pieza limpia, sino que, mediante la aspiración se evita que la herramienta se caliente en exceso debido a la acumulación de la viruta en el canal de fresado. Además, las virutas y el polvo pueden acabar entrando en los cojinetes de los husillos o en cualquier otra parte de la máquina provocando averías a largo plazo.

- Re-instalación del sistema de refrigeración de la herramienta. Es importante la refrigeración de la herramienta durante el mecanizado con materiales de aleaciones blandas ya que la fricción es la principal causante de la generación de calor y el desgaste de la herramienta. El mantener la herramienta siempre a baja temperatura como la superficie de la pieza limpia de virutas y escorias es fundamental tanto para la durabilidad de las herramientas como para unos mejores acabados en los mecanizados de los modelos.
- Por otro lado la atenuación del error producido por el juego. Para que suceda esto la única solución disponible es esperar y estar atentos a que la comunidad de Grbl actualice su firmware a la última versión, que contará con unos parámetros que eliminaría prácticamente este problema.



# Bibliografía

- [1] G. Boothroyd, W.A. Knight. Fundamentals of Machining and Machine Tools. Marcel Dekker, New York, 1989.
- [2] J. D. Zamanillo, P. Rosado. Procesos de Fabricación. Tomo II (Planificación de procesos). SPUPV, Valencia, 1995.
- [3] Tomás González Olabarria. Evolución y características del sector de las máquinas herramienta en España y País Vasco. [Trabajo fin de grado]. Bilbao: Universidad del País Vasco; 2015
- [4] Chamnit, Simen, Tmpvar, Protoneer, Jgeisler0303, Robgrz, et al. [Internet]. Grbl v0.9j [actualizado el 17 de marzo de 2016; acceso 22 de junio de 2016]. Disponible en: <https://www.github.com/grbl/grbl>
- [5] Vlachoudis. [Internet]. bCNC [actualizado el 8 de julio de 2016; acceso 26 de junio de 2016]. Disponible en: <https://www.github.com/vlachoudis/bCNC>
- [6] David Cuartielles. [Internet]. Arduino [acceso 26 de junio de 2016]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/>
- [7] Fundación Raspberry Pi. [Internet]. Raspberry Pi [acceso 26 de junio de 2016]. Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/>
- [8] SolidWorks Corporation. [Internet]. Manual SolidWorks [acceso 24 de junio de 2016]. Disponible en: [https://www.solidworks.com/sw/docs/Instructor\\_WB\\_2011\\_ESP.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/Instructor_WB_2011_ESP.pdf)
- [9] Dedalo. [Internet]. Motores CNC. [actualizado el 25 de febrero de 2010; acceso el 8 de junio de 2016] Disponible en: <https://www.talldedalo.es/web/MundoCNC/Motores>
- [10] José M. Drake Moyano. Ruidos e Interferencias: Técnicas de reducción. [Monografía en Internet]. Santander, 2005 [acceso el 18 de junio de 2016] Disponible en: <https://www.ctr.unican.es>



# Capítulo 7

## Anexos

1

2

3

4

A

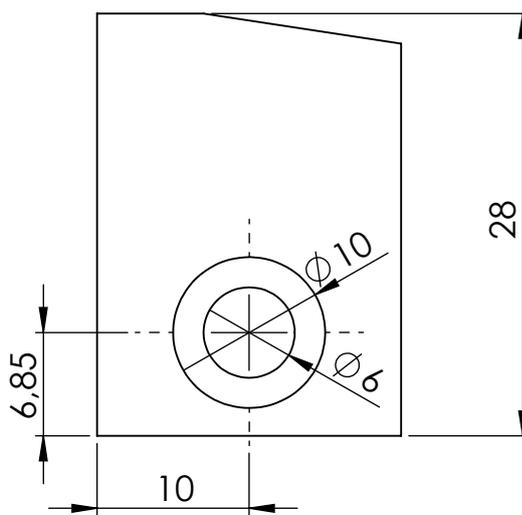
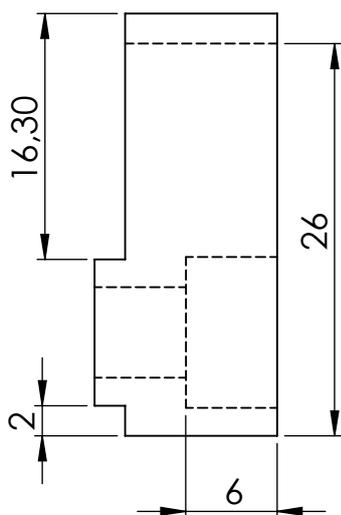
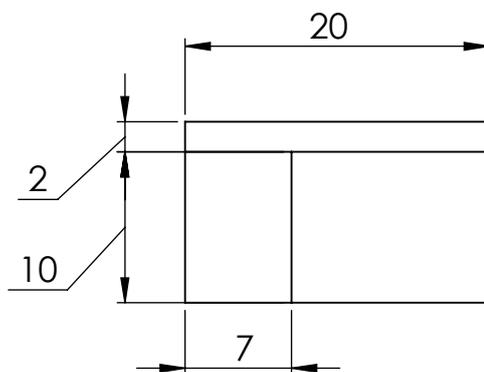
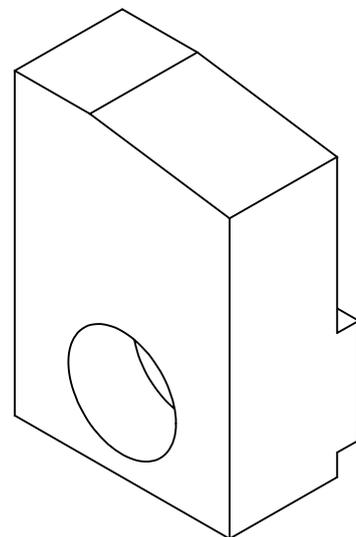
B

C

D

E

F



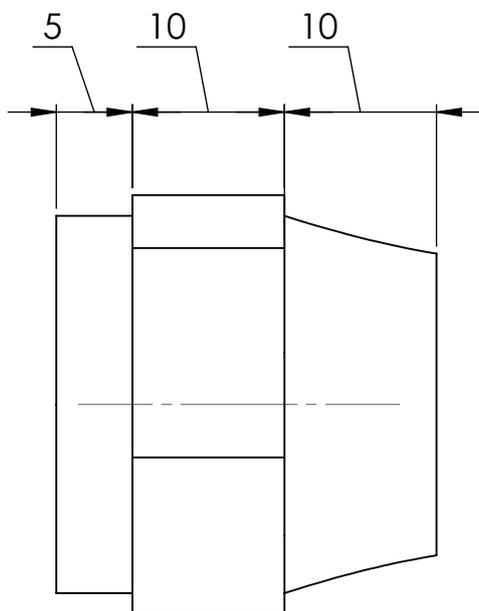
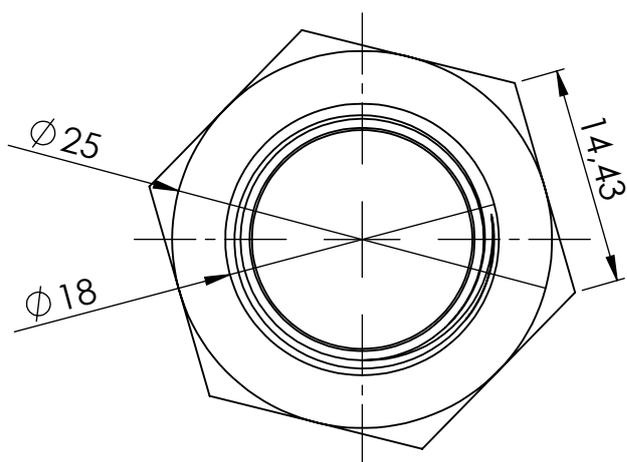
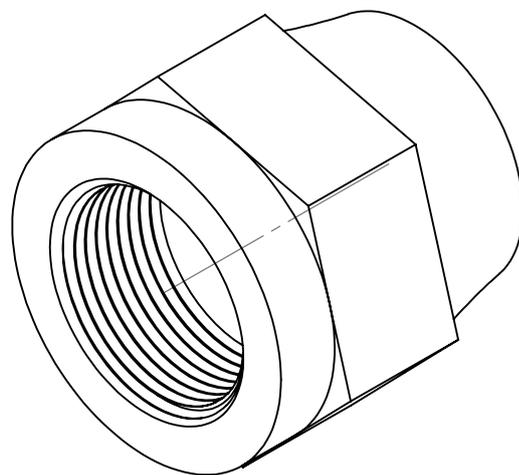
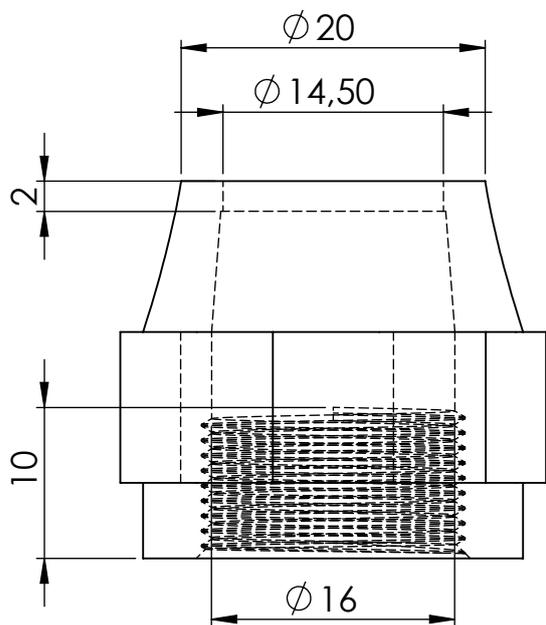
Material: <b>Acero</b>		Descripción <b>Tope mecánico eje Y</b>	
		Autor Israel Gil Gallego	Fecha de dibujo
Drawing Scale: <b>2:1</b>			
Tamaño <b>A4</b>		Número de dibujo <b>1</b>	Hoja <b>1 of 1</b>
		Revision:	

1

2

3

4



A

B

C

D

E

F

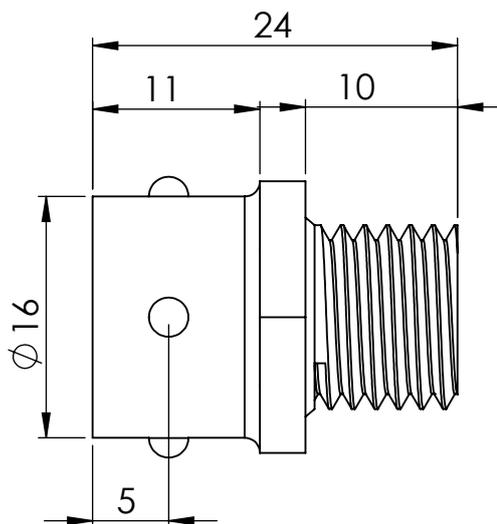
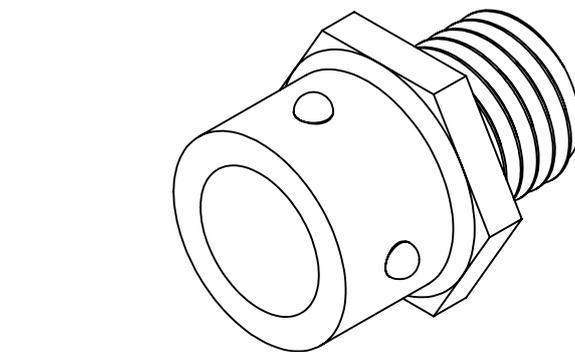
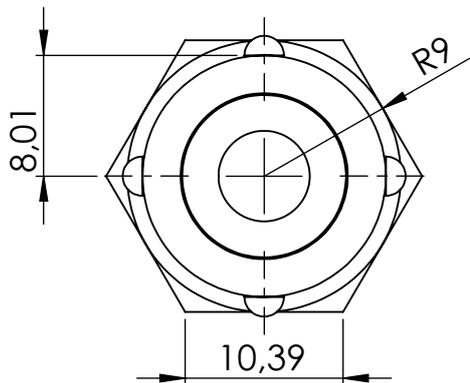
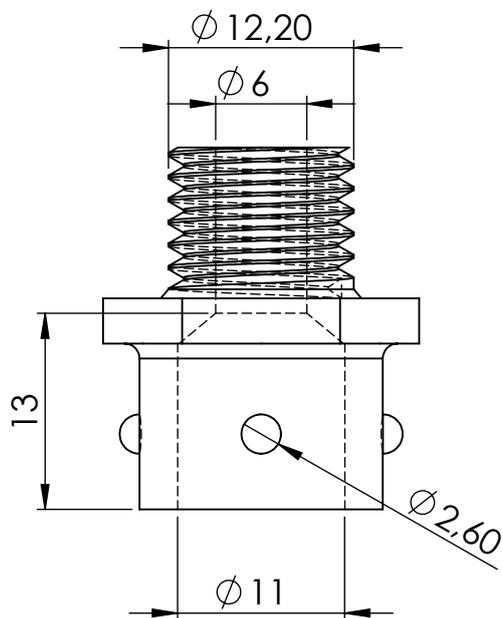
Material: <b>ABS</b>		Descripción <b>Tuerca roscada</b>	
		Autor Israel Gil Gallego	Fecha de dibujo
Escala <b>2:1</b>			
Tamaño <b>A4</b>		Número de dibujo <b>2</b>	Hoja <b>1 of 1</b>
		Revision:	

1

2

3

4



A

B

C

D

E

F

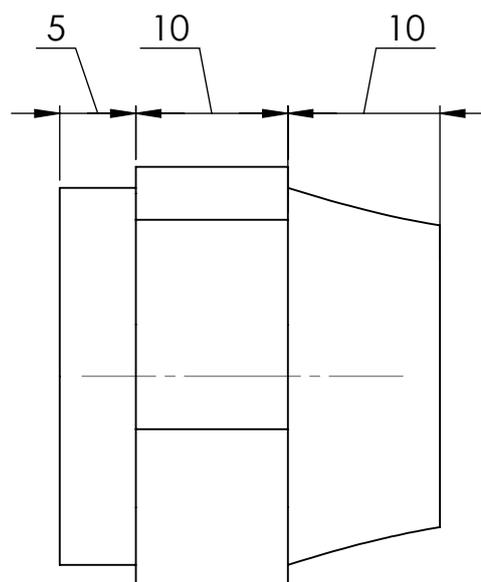
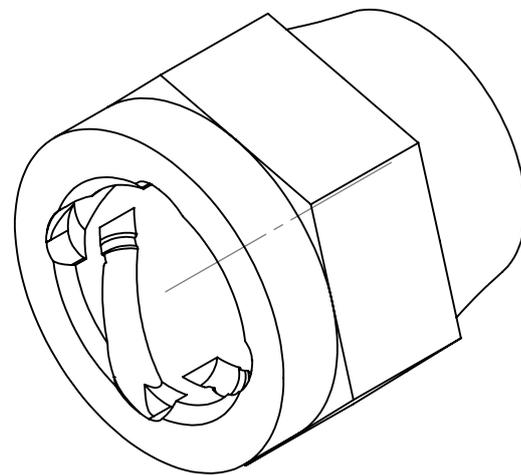
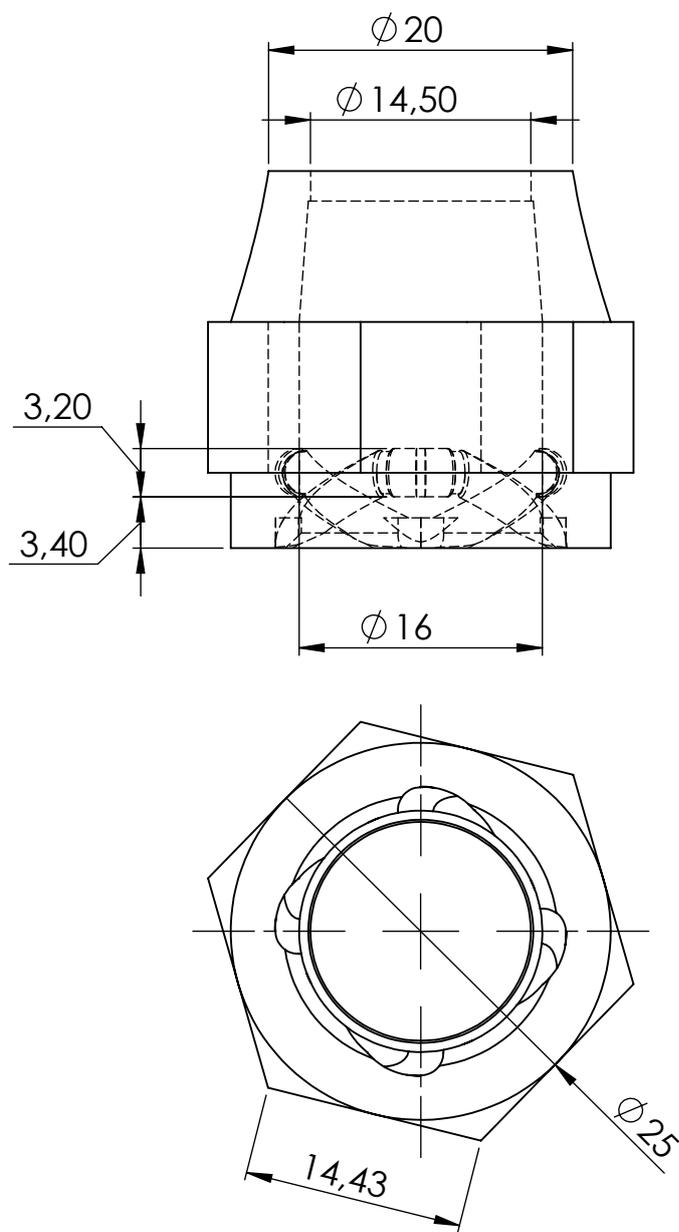
Material:		ABS		Descripción		<b>Totnillo de acople</b>	
Escala		2:1				Autor	Fecha de dibujo
Tamaño		<b>A4</b>		Número de dibujo		Hoja	Revision:
				<b>3</b>		<b>1 of 1</b>	

1

2

3

4



A

B

C

D

E

F

Material:		ABS		Descripción		<b>Tuerca acople</b>	
				Autor		Fecha de dibujo	
				Israel Gil Gallego			
Escala		2:1					
		Tamaño		Número de dibujo		Hoja	
		<b>A4</b>		<b>4</b>		<b>1 of 1</b>	
						Revision:	

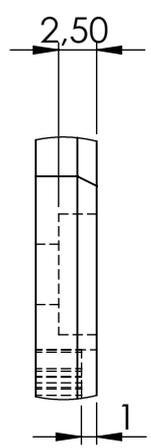


1

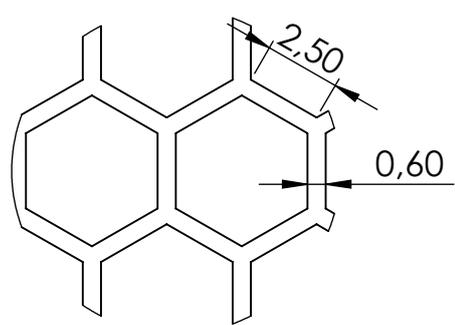
2

3

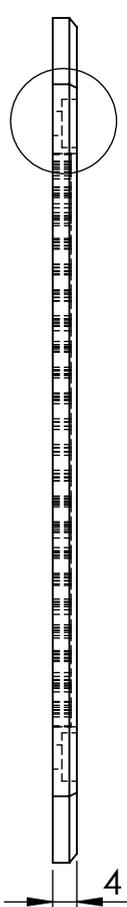
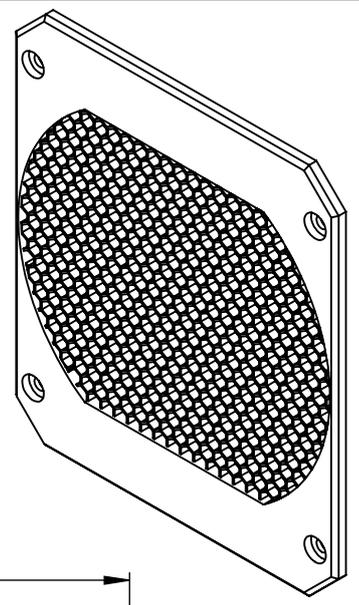
4



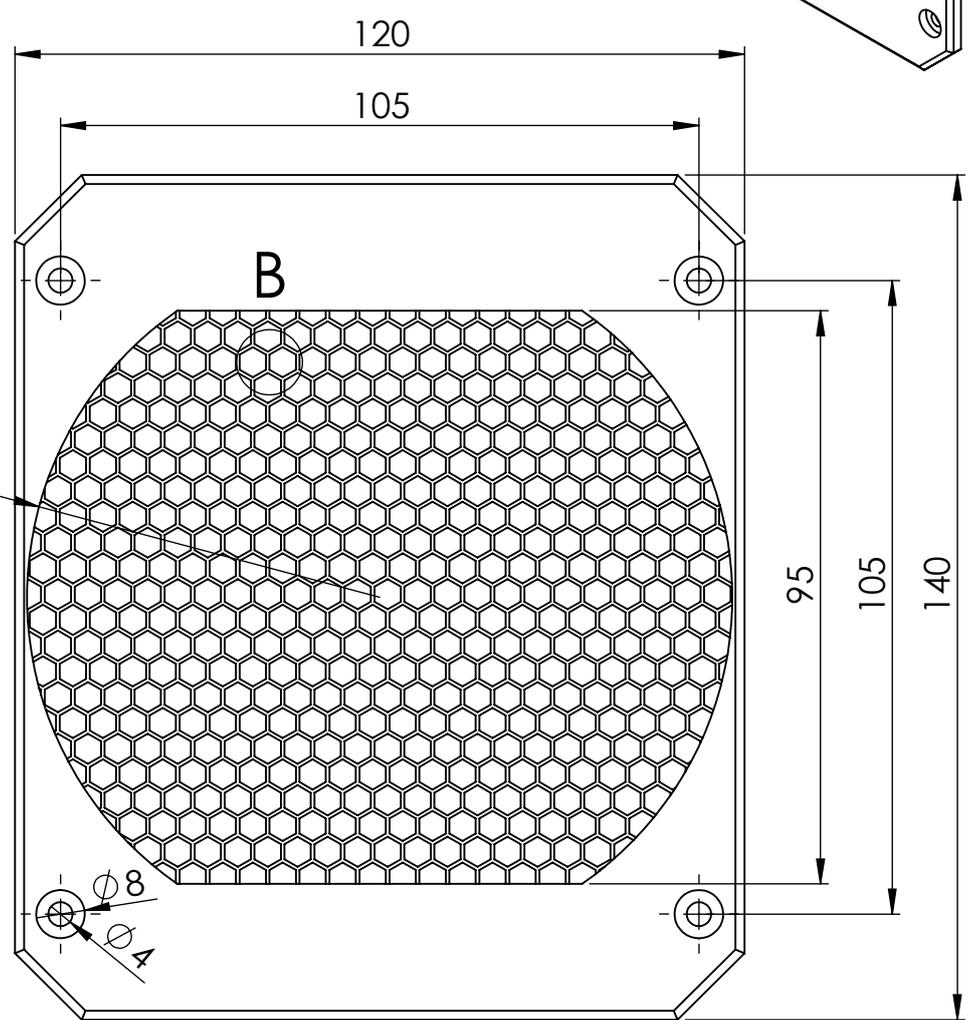
**DETALLE A**  
SCALE 2 : 1



**DETALLE B**  
SCALE 4 : 1



A



B

R58

∅8  
∅4

95  
105  
140

A

B

C

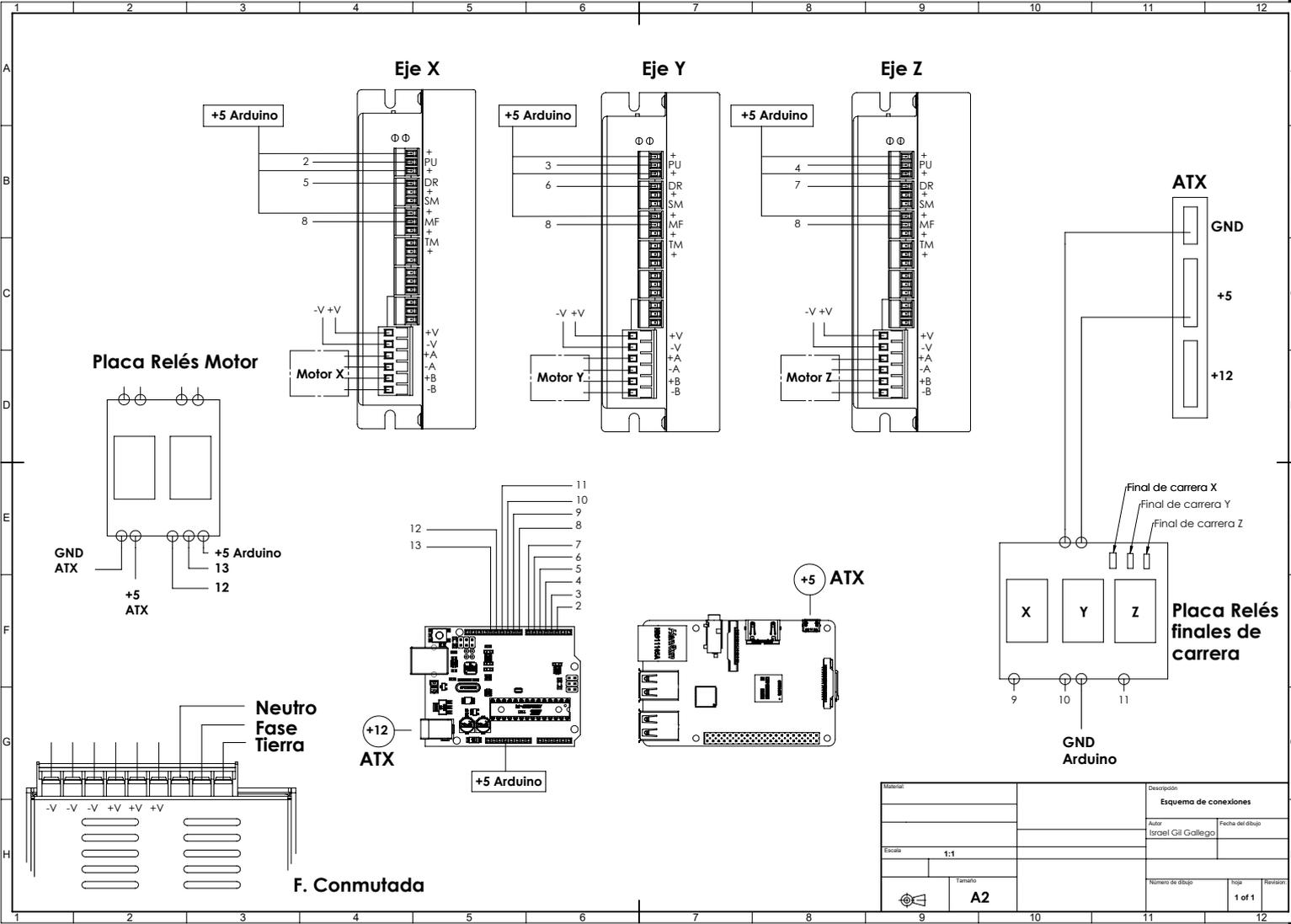
D

E

F

Material:		ABS		Descripción		<b>Reja de ventilación</b>	
				Autor		Fecha de dibujo	
				Israel Gil Gallego			
Escala		2:2.5					
		Tamaño		Número de dibujo		Hoja	
		<b>A4</b>		5		1 of 1	
						Revision:	





Escala		1:1		Tamaño		A2	
Descripción				Esquema de conexiones			
Autor				Fecha del dibujo			
Israel Gil Gallego							
Número de dibujo				Hoja		Revisión	
				1 of 1			