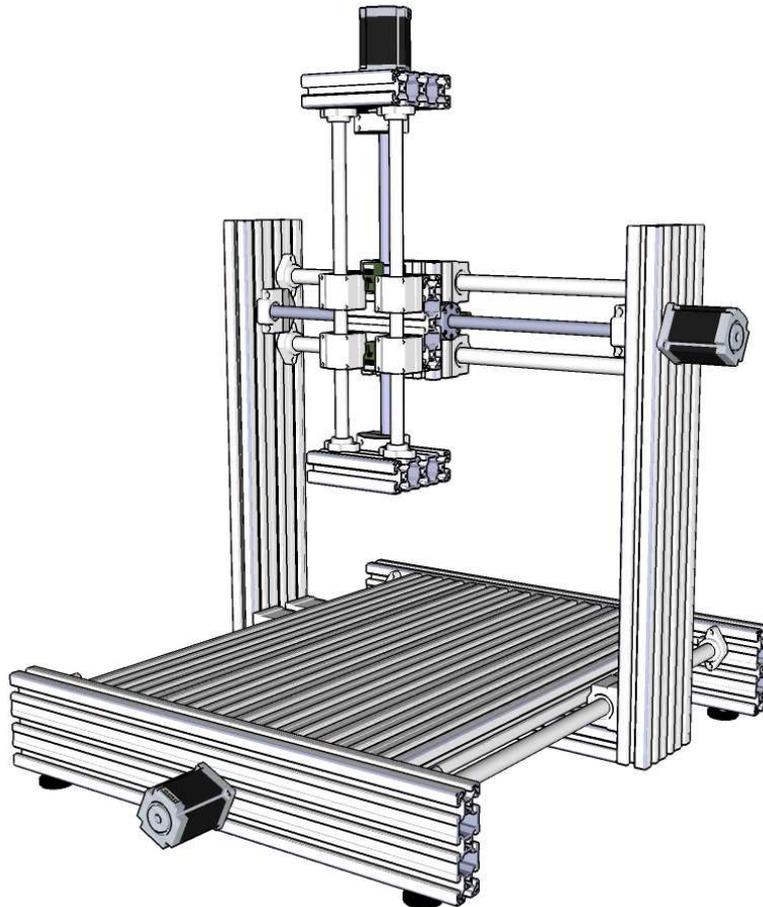


## Proyecto Final de Carrera



# **Diseño y construcción de una máquina de control numérico con control en tiempo real mediante dispositivo apuntador**

**Autor:** Daniel Samper Martínez

**Director:** Francisco José Abad Cerdá

Valencia, 29 de Septiembre de 2011







## Índice

1.	Introducción .....	3
2.	Antecedentes .....	6
2.1.	Características .....	6
2.1.1.	Número de ejes .....	7
2.1.2.	Sistema de control.....	10
2.1.3.	Actuadores .....	11
2.1.4.	Sistema de movimiento.....	21
3.	Estado del arte .....	28
3.1.	Máquina de control numérico .....	28
3.1.1.	Estudio global de soluciones encontradas en la red .....	28
3.1.2.	Estudio de una solución comercial: Marchant Dice Ltd. ....	30
3.2.	Software de control manual.....	32
4.	Especificación de requisitos .....	36
4.1.	Máquina de control numérico .....	36
4.2.	Aplicación gráfica de control manual.....	37
5.	Diseño.....	38
5.1.	Máquina de control numérico .....	38
5.1.1.	Materiales .....	39
5.1.2.	Herramientas.....	61
5.1.3.	Proceso de fabricación .....	63
5.2.	Control manual.....	80
5.2.1.	Software usado.....	80
5.2.2.	Visión general del diseño .....	82
5.2.3.	Ejemplo de sesión de trabajo .....	85
5.2.4.	Diagrama de clases.....	88
5.2.5.	Clase PantoMax.....	89
5.2.6.	Clase MachineControl .....	92
5.2.7.	Clase Monitor .....	93
5.2.8.	Clase CncPoint .....	94
5.2.9.	Clase MiniArea .....	94



5.2.10. Clase ScribbleArea .....	95
6. Resultados .....	98
6.1. Máquina de control numérico .....	98
6.2. PantoMax .....	105
7. Conclusiones.....	106
7.1. Máquina de control numérico .....	106
7.2. PantoMax .....	107
Anexo A: Manual de usuario .....	108
Bibliografía .....	109

## 1. Introducción

El control numérico (CN) es un sistema de automatización de máquinas-herramienta que son operadas mediante comandos programados en un medio de almacenamiento. El sistema se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático, por lo que estaríamos tratando de un control numérico por computador (CNC) (Figura 1).



Figura 1: Fresadora CNC  
Fuente: <http://www.bermag.ro/>

La aplicación de sistemas de CNC en las máquinas-herramienta han hecho aumentar enormemente la producción, al tiempo que ha hecho posible efectuar operaciones de conformado que era difícil de hacer con máquinas convencionales, por ejemplo la realización de superficies esféricas manteniendo un elevado grado de precisión dimensional. Finalmente, el uso de CNC incide favorablemente en los costos de producción al reducir los costes de fabricación de muchas máquinas, manteniendo o mejorando su calidad.

Actualmente existen en el mercado una infinidad de máquinas de control numérico con múltiples configuraciones y posibilidades, siendo una característica muy común el elevado coste económico de las mismas. Debido a esto, surgen en la red muchas propuestas de máquinas de control numérico caseras (Figura 2) usando materiales de fácil manipulación (madera, plástico, etc.) y componentes reciclados como motores de impresora o guías de escáneres. También surgen propuestas más profesionales en las que se usan mejores componentes y materiales más adecuados (como aluminio o acero).



Figura 2: Máquina de control numérico casera  
Fuente: <http://www.homegrowncnc.com>

El proyecto que se presenta en esta memoria consiste en la creación de una máquina **profesional** CNC de 3 ejes a un mínimo coste, fácil de fabricar, fácilmente ampliable a más ejes (por módulos) y que posea una alta precisión. Con ello se busca que cualquier persona interesada en la fabricación con máquina de control numérico pueda crear la suya propia a un bajo coste y sin necesidad de poseer una gran cantidad de herramientas. Este proyecto ha sido bautizado en Internet como AHIP CNC (Affordable High Precision CNC) para darse a conocer al público en general.

Adicionalmente al diseño y construcción de la máquina de control numérico descrita, se ha desarrollado PantoMax, una aplicación para controlar en tiempo real la máquina CNC mediante un dispositivo apuntador (ratón o tableta gráfica). PantoMax es la versión digital de un dispositivo mecánico llamado pantógrafo (Figura 3), dispositivo de dibujo capaz de copiar una figura o reproducirla a una escala distinta.

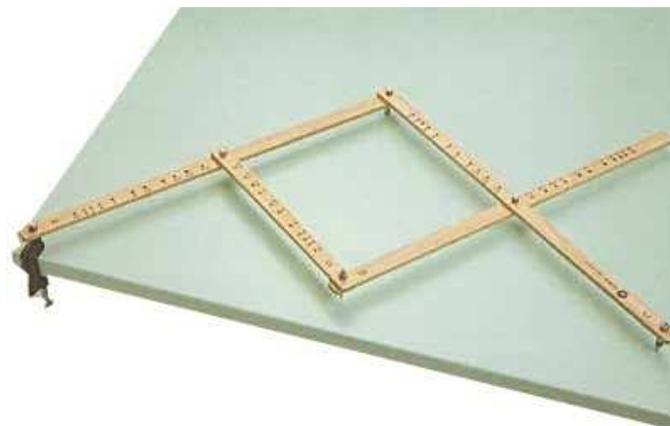


Figura 3: Pantógrafo tradicional

A diferencia del pantógrafo, PantoMax es capaz, con la herramienta adecuada acoplada a la máquina, de realizar tallados o cortes en materiales con una elevadísima precisión en el escalado. Se han añadido también otras funcionalidades como el guardado/carga del trazo realizado o la monitorización de la posición en tiempo real de la herramienta. En caso de usar una tableta gráfica, se detecta la presión realizada sobre la misma, variando la altura de la herramienta y por tanto permitiendo realizar tallados con diferentes profundidades.

En la presente memoria se tratarán en detalle todos los aspectos que conforman este proyecto:

- **Antecedentes:** Se proporciona la información indispensable para la correcta valoración de las características de una máquina de control numérico, ofreciendo para cada una de estas características sus principales ventajas e inconvenientes.
- **Estado del arte:** Se realiza un estudio de las soluciones ya existentes tanto de máquinas de control numérico como de modos de control manual en estas máquinas, estudio que nos permite, con los antecedentes previamente proporcionados, disponer de una evaluación crítica de estas soluciones y aprovechar sus bondades en nuestro diseño.
- **Especificación de requisitos:** Se especifican los requisitos tanto para la máquina de control numérico como para el control manual a implementar. Esto fijará las funcionalidades y características necesarias para el diseño de la solución.
- **Diseño:** Ajustándose a los requisitos anteriormente planteados, se proporcionan los diseños para la solución de ambos componentes, detallando su funcionamiento y la metodología de desarrollo seguida.
- **Resultados:** Se realiza una evaluación de las soluciones realizadas para comprobar que se han alcanzado los objetivos propuestos.
- **Conclusiones:** Se describe el desarrollo del proyecto, conclusiones alcanzadas y se plantean posibles trabajos futuros.

## 2. Antecedentes

En este capítulo se proporciona la información indispensable para la correcta valoración de las características de una máquina de control numérico, ofreciendo para cada una de estas características sus principales ventajas e inconvenientes.

### 2.1. Características

Las máquinas de control numérico se pueden clasificar en función de las siguientes características:

- Número de ejes
- Sistema de control
- Tipo de actuadores
- Sistema de movimiento

Una misma máquina de control numérico puede tener una gran variedad de herramientas acopladas a la misma. Una máquina-herramienta es la unión entre una máquina CNC y una herramienta. Entre las herramientas más frecuentemente acopladas encontramos:

- Fresas
- Taladros
- Corte por plasma
- Corte por agua
- Corte y grabado por láser
- Oxicorte

### 2.1.1. Número de ejes

Una máquina de control numérico puede tener desde uno hasta más de seis ejes. Cada eje contará con un actuador que será el responsable del movimiento del mismo. El número de ejes necesarios para alcanzar una posición cualquiera es tres, mientras que para alcanzar una posición con una orientación de la herramienta determinada necesitamos un total de seis ejes. Cualquier máquina con más de seis ejes tendrá ejes redundantes.

En primer lugar comenzaremos con las máquinas de 1 eje. Este tipo de máquinas únicamente son capaces de desplazar su herramienta a lo largo de un eje. El caso más frecuente de este tipo de máquina es el escáner de imágenes/documentos (Figura 4).



Figura 4: Escáner doméstico

Con dos ejes conseguimos desplazar la herramienta en el plano X-Y. La máquina de control numérico más frecuente que encontramos con esta configuración es la impresora (Figura 5). En esta máquina el cabezal de impresión es la herramienta, y los ejes los formarían el rodillo encargado de desplazar el papel y las guías sobre las que se desplaza el cabezal de impresión.



Figura 5: Impresora doméstica

Una máquina de control numérico de 3 ejes será capaz de alcanzar cualquier posición tridimensional en su área de trabajo, lo que permite realizar modelos en tres dimensiones. Una configuración de 3 ejes muy común es el router CNC (ampliamente usado en la industria de la madera y el metal) (Figura 6).



Figura 6: Router o fresadora CNC  
Fuente: <http://www.allproducts.com>

Otra configuración de 3 ejes diferente pero también muy usada es la del torno (Figura 7). La diferencia entre ésta y el router radica en que el torno posee un eje de revolución, mientras que en el router todos los ejes son lineales.



Figura 7: Torno con control numérico  
Fuente: <http://www.haascnc.com>

Esto permite al torno crear piezas de revolución (Figura 8) que no serían posibles con un router:

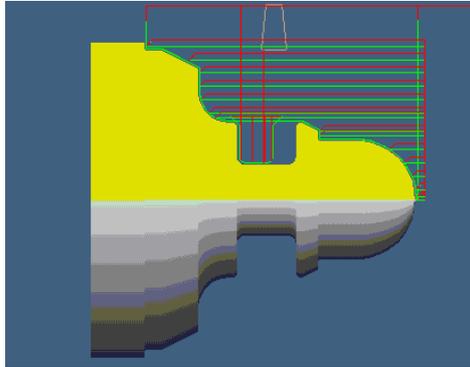


Figura 8: Pieza de revolución  
Fuente: <http://www.homanndesigns.com>

Cualquier máquina por encima de tres ejes (Figura 9) será capaz de realizar una orientación de la herramienta acoplada, y por tanto de realizar figuras con formas más complejas:



Figura 9: Máquina de control numérico de 5 ejes  
Fuente: <http://lec-composites.com>

### 2.1.2. Sistema de control

Una máquina de control numérico puede usar un sistema de control en bucle abierto o bucle cerrado. En un sistema de bucle abierto (Figura 10) se conoce la posición de la herramienta sin necesidad de usar dispositivos que nos informen de ello (por ejemplo encoders).

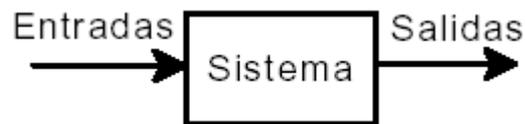


Figura 10: Esquema de sistema de control en bucle abierto

El sistema de este sistema de control reside en generar una salida determinada ante una entrada determinada. Un ejemplo de sistema de control de bucle abierto es un grifo, ya que en este sistema la salida (el caudal de agua) únicamente depende de la entrada (la apertura de la llave de paso).

Por el contrario, en un sistema de bucle cerrado (Figura 11) necesitamos dispositivos que capturen la posición en el eje para calcular el error de posicionamiento y corregirlo. Esto aumenta el coste total de la máquina.

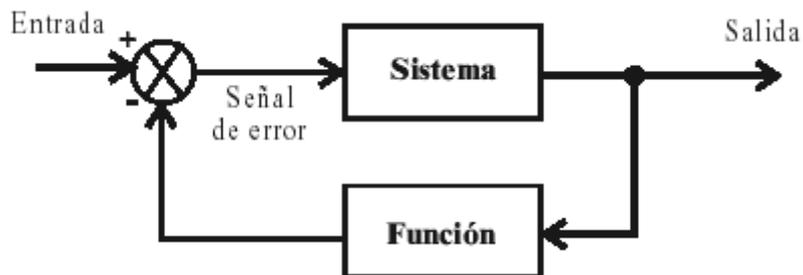


Figura 11: Esquema de sistema de control en bucle cerrado

Los actuadores usados en las máquinas de control numérico dependen del sistema de control utilizado en el mismo. En la siguiente sección trataremos en detalle los actuadores más utilizados.

### 2.1.3. Actuadores

#### 2.1.3.1. Motor paso a paso

En primer lugar trataremos el actuador más utilizado en sistemas de control de bucle abierto. Este actuador es el motor paso a paso (Figura 12), un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa es que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control.



Figura 12: Motor paso a paso

Entre sus principales ventajas se encuentran:

- Alta repetitividad en cuanto al posicionamiento
- Al carecer de escobillas se alarga su vida útil y no genera chispas, lo que los hace más aptos para trabajar en entornos inflamables
- Uso en sistemas de control de bucle abierto, lo que evita el uso de encoders y por tanto reduce el coste global del sistema
- Es capaz de bloquear el rotor en una posición determinada con un momento de fuerza (*torque*) muy alto
- Su velocidad de rotación no depende de la carga acoplada a su rotor.

Como único inconveniente encontramos un control más complejo del mismo, aunque existen en el mercado una gran variedad de controladores de este tipo de motores que simplifican enormemente esta tarea.

Su funcionamiento se basa en el principio de electromagnetismo. Existe un rotor de hierro dulce o magnetizado rodeado por los estatores electromagnéticos. El rotor y el estátor poseen polos que pueden encontrarse dentados dependiendo del tipo motor. Cuando el estátor se encuentra energizado el rotor se mueve para alinearse con él (en el caso de motores de imán permanente) o se mueve para tener la menor distancia con el estátor (en el caso de los motores de reluctancia variable). Es por ello que debemos energizar a los estatores en una secuencia determinada para que se produzca el movimiento del rotor.

En lo que respecta al control de estos motores destacar dos funcionalidades básicas implementadas en cualquier controlador de motores paso a paso. Con la técnica conocida como microstepping es posible aumentar el número de pasos en este tipo de motores, aumentando por tanto la resolución del motor. La otra funcionalidad básica consiste en la regulación de la intensidad que circula por las bobinas del motor por medio de un procedimiento conocido como *Chopping*. Este procedimiento permite el uso de voltajes muy altos, ya que la intensidad que circula por las bobinas siempre será la misma (es decir, es independiente del voltaje). Un alto voltaje hace que se alcance la intensidad nominal de las bobinas en un menor tiempo y por tanto, permite que los motores giren más rápido.

Los tipos de motores paso a paso se pueden clasificar por su principio de funcionamiento:

- Motor paso a paso de imán permanente
- Motor paso a paso de reluctancia variable
- Motor paso a paso híbrido
- Motor paso a paso unipolar
- Motor paso a paso bipolar

2.1.3.1.1. De imán permanente

Los polos del rotor y el estátor en este tipo de motores carecen de dientes. En cambio el rotor posee polos sur y norte alternativos, quedando paralelos al eje del mismo (Figura 13). Permite mantener un par diferente de cero cuando el motor no está energizado. Dependiendo de la construcción del motor, es posible obtener pasos angulares de 7.5, 11.25, 15, 18, 45 o 90°.

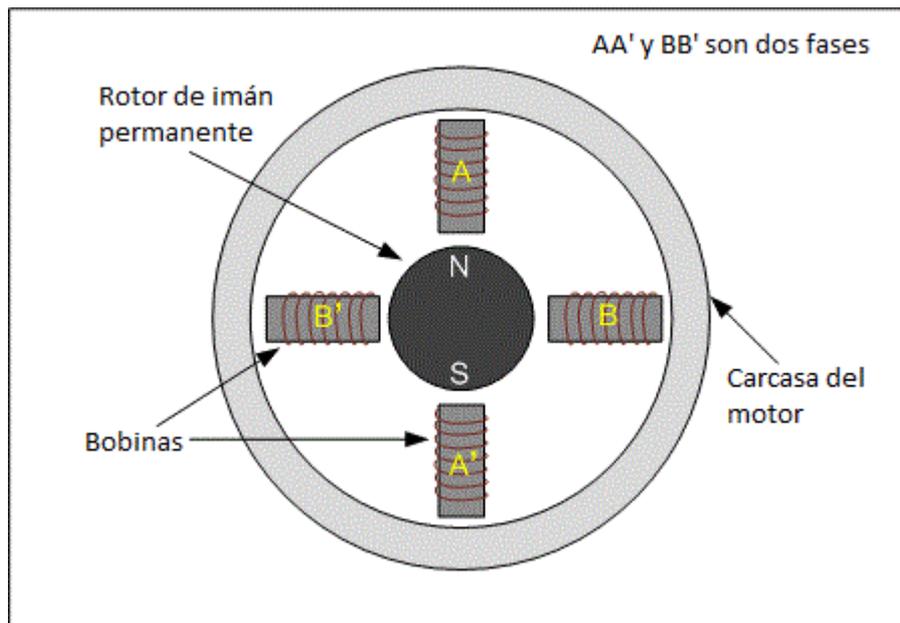


Figura 13: Motor paso a paso de imán permanente

El rotor de imán permanente se alinea siempre con el campo magnético generado al energizar el estátor. De esto deducimos que debemos proporcionar una secuencia de energizado a los estátors para colocar el rotor en el ángulo deseado (Figura 14).

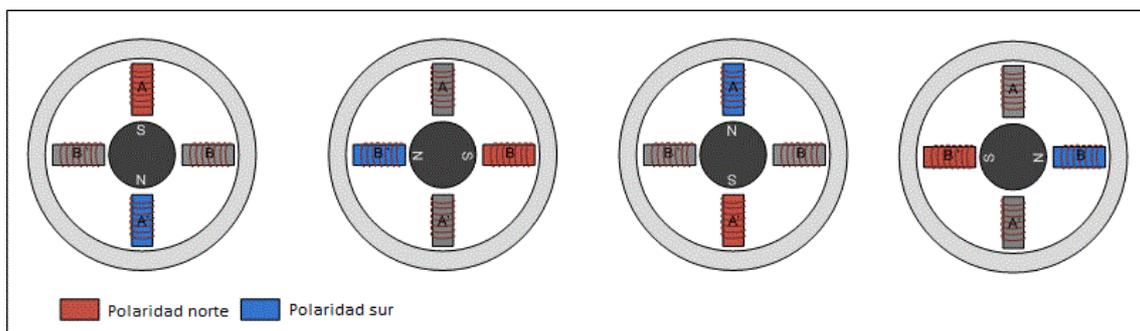


Figura 14: Funcionamiento de motor paso a paso de imán permanente

Se puede aumentar la resolución de estos motores aumentando el número de polos del rotor o incrementando el número de fases (Figura 15).

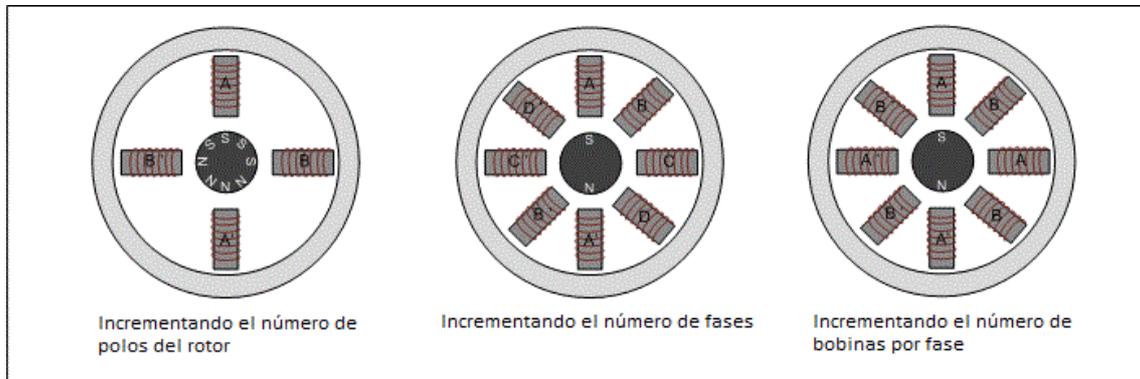


Figura 15: Métodos para incrementar la resolución en un motor PaP de imán permanente

### 2.1.3.1.2. De reluctancia variable

Este motor posee un dentado en un rotor de hierro dulce (Figura 16). Cuando la bobina del estátor se energiza el rotor se mueve para minimizar la distancia entre el estátor y el diente. La inercia del rotor de un motor de paso de reluctancia variable es pequeña y la respuesta es muy rápida, pero la inercia permitida de la carga es pequeña. Cuando los devanados no están energizados, el par estático de este tipo de motor es cero. Generalmente, el paso angular de este motor de reluctancia variable es de 15°.

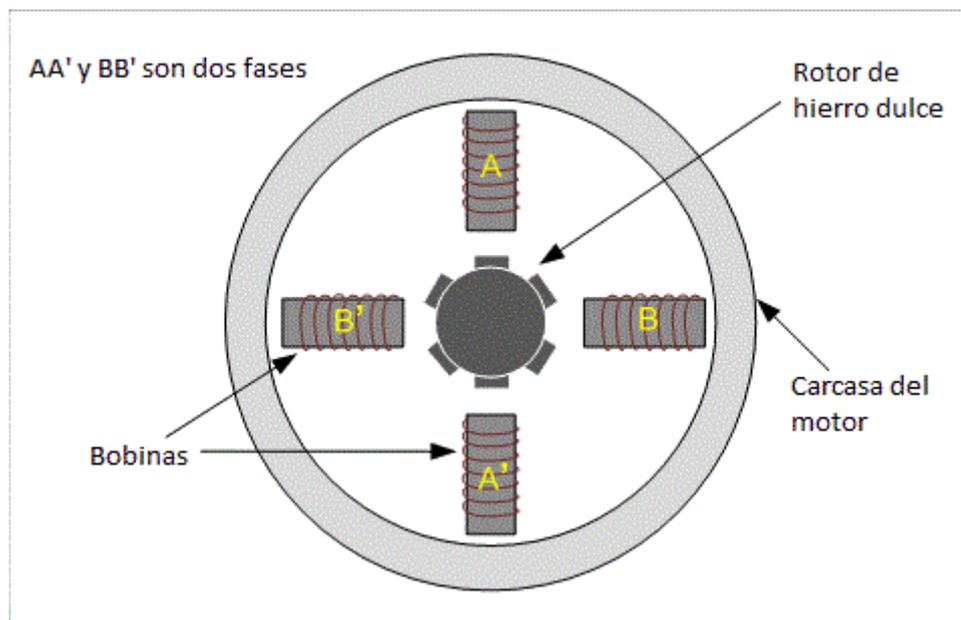


Figura 16: Motor paso a paso de reluctancia variable

El diseño del rotor hace que cuando alineamos uno de los dientes del mismo con una de las fases, el siguiente diente se encuentre desalineado con la siguiente fase. Esto permite que cuando energicemos la siguiente fase este diente desalineado pase a alinearse. Energizando las fases con la secuencia correcta conseguimos el movimiento continuo del rotor (Figura 17).

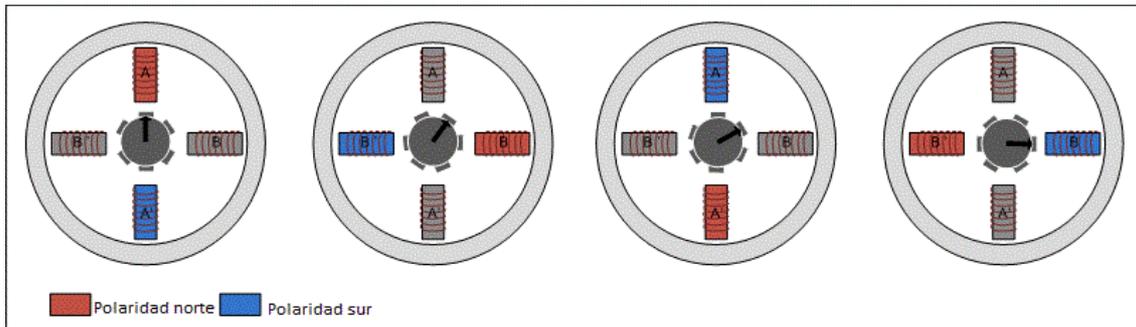


Figura 17: Funcionamiento de motor paso a paso de reluctancia variable

Se puede incrementar la resolución de estos motores aumentando el número de dientes del rotor o incrementando el número de fases (Figura 18).

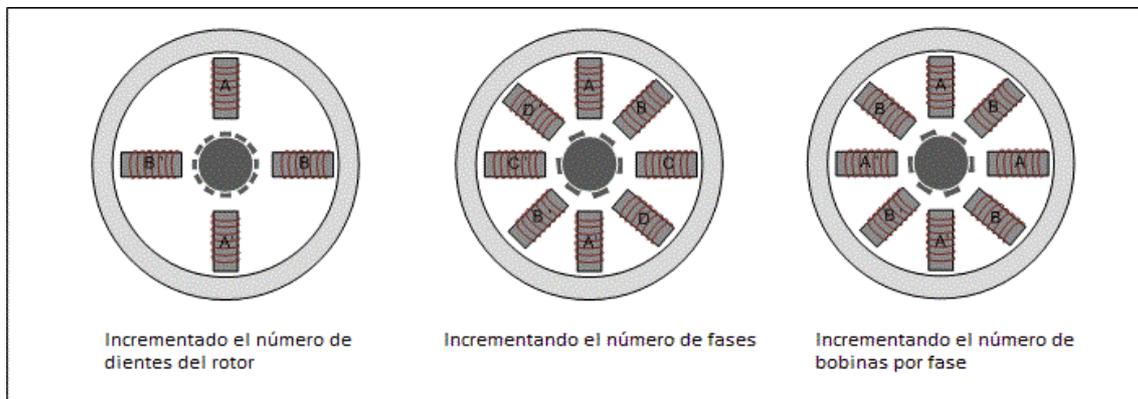


Figura 18: Métodos para incrementar la resolución de un motor PaP de reluctancia variable

### 2.1.3.1.3. Híbrido

El motor híbrido es una combinación del motor de reluctancia variable y del motor de imán permanente, por lo que el rotor de este tipo de motores posee dientes y se encuentra magnetizado (Figura 19). Este tipo de motor tiene una alta precisión, alto par y se puede configurar para suministrar un paso angular de hasta  $0.9^\circ$ .

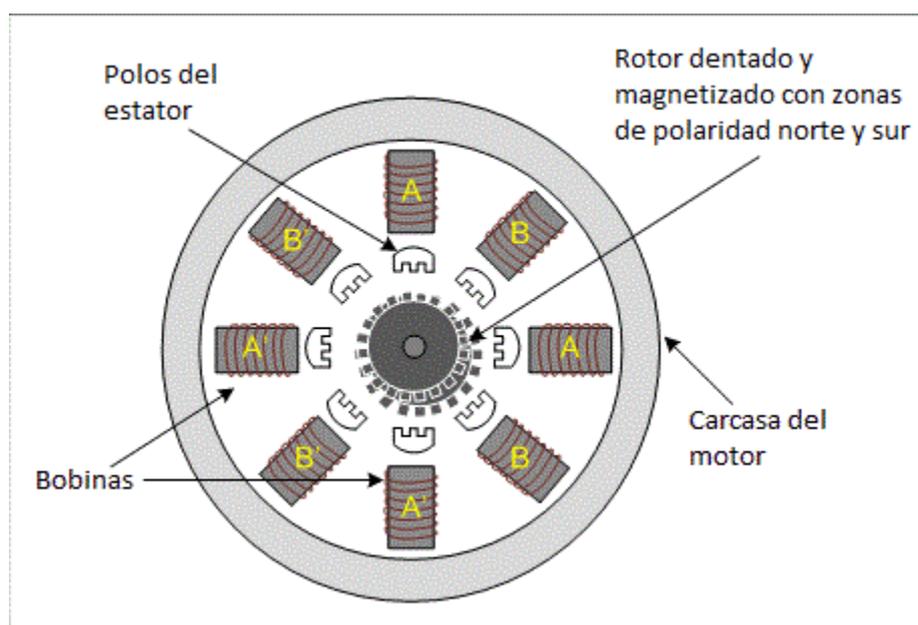


Figura 19: Motor paso a paso híbrido

El rotor posee dos zonas, una con polaridad norte y otra con polaridad sur. Estas zonas se han diseñado de forma que los polos de una de las zonas coinciden con los huecos entre los polos de la otra zona (Figura 20).

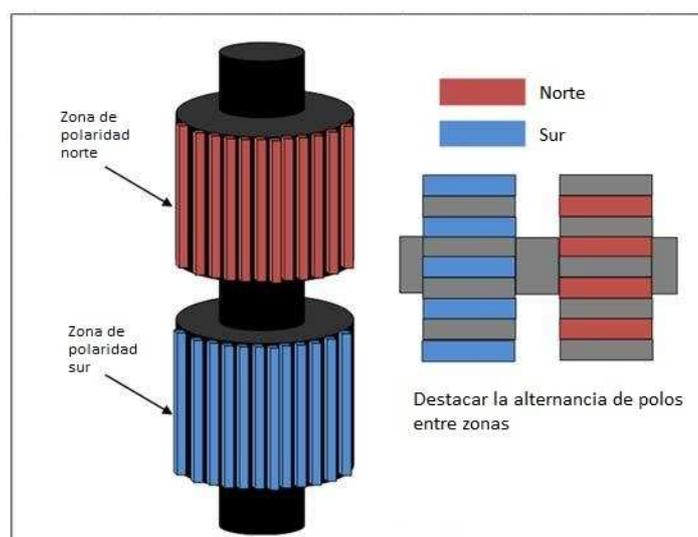


Figura 20: Rotor de motor paso a paso híbrido

Como en los motores anteriores, el motor híbrido necesita de una secuencia de energización de sus fases para producir el movimiento del rotor (Figura 21).

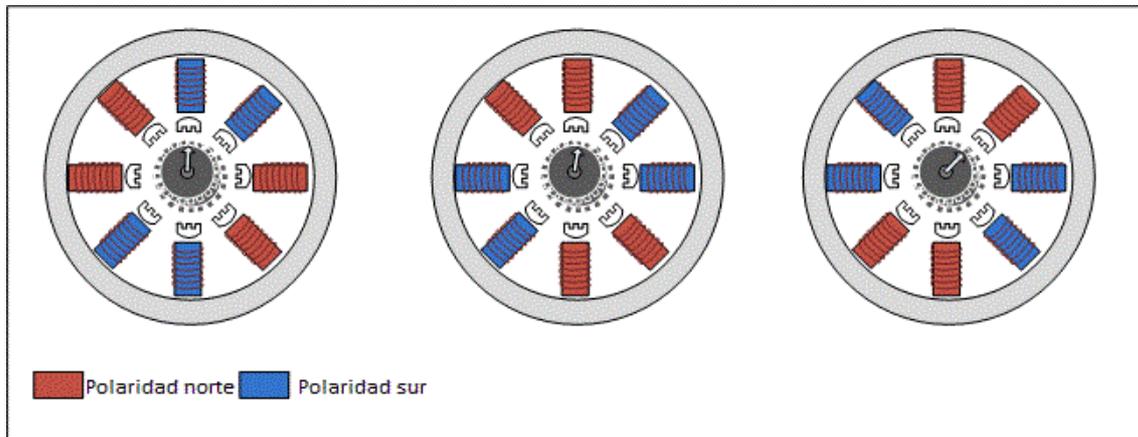


Figura 21: Funcionamiento de motor paso a paso híbrido

Los motores paso a paso también se pueden clasificar por su conexionado:

- Motor paso a paso bipolar
- Motor paso a paso unipolar

#### 2.1.3.1.4. Unipolar

Los motores unipolares son relativamente fáciles de controlar, gracias a que poseen devanados duplicados. Estos motores poseen dos bobinas en cada eje del estator (Figura 22), que están unidas por extremos opuestos, de tal modo que al ser alimentada una u otra, generan cada una un campo magnético inverso al de la otra. Esta duplicación se hace para facilitar el diseño del circuito de control, ya que permite el uso, en la parte de potencia, de un transistor único por cada uno de los bobinados.

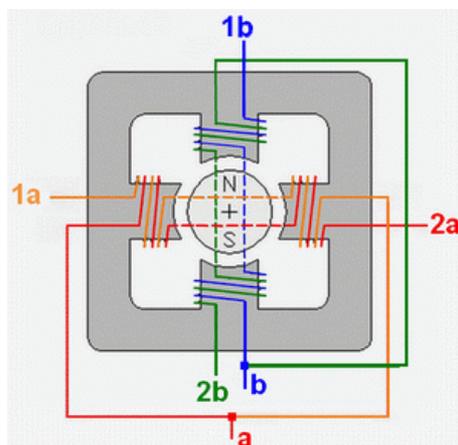


Figura 22: Esquema de motor paso a paso unipolar

En el esquema más común de conexión se unen los "puntos medios" de ambos ejes (a y b en el dibujo) y se les conecta al positivo de la alimentación del motor. El circuito de control de potencia, entonces, se limita a poner a masa los bobinados de manera secuencial (Figura 23).

Rotación horaria →								
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1a</b>	1	0	0	0	1	0	0	0
<b>1b</b>	0	1	0	0	0	1	0	0
<b>2a</b>	0	0	1	0	0	0	1	0
<b>2b</b>	0	0	0	1	0	0	0	1

Figura 23: Secuencia para rotación horaria en motor PaP unipolar

#### 2.1.3.1.5. Bipolar

Los motores bipolares carecen de doble bobinado por estator (Figura 24), lo que implica tener que cambiar frecuentemente la polaridad del mismo, requiriendo circuitos de control y de potencia más complejos. En la actualidad esto no es problema, ya que estos circuitos se suelen implementar en un integrado, que soluciona esta complejidad en un solo componente.

Como no tienen el doble bobinado de los unipolares (recordemos que en éstos todo el tiempo se está utilizando sólo una de las bobinas duplicadas, mientras la otra queda desactivada y sin ninguna utilidad), los motores bipolares ofrecen una mejor relación entre torque y tamaño/peso.

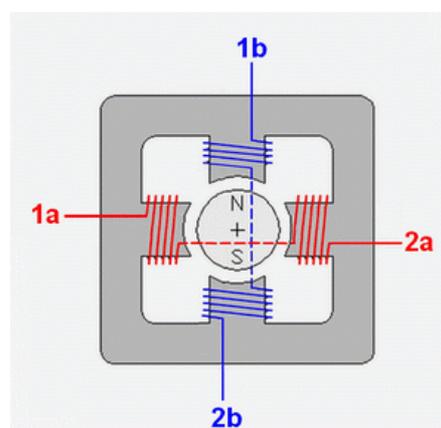


Figura 24: Esquema de motor paso a paso bipolar

En la Figura 25 se muestra la secuencia de polaridades necesaria para hacer girar el rotor en sentido horario.

Rotación horaria →								
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1a</b>	+	-	-	-	+	-	-	-
<b>1b</b>	-	+	-	-	-	+	-	-
<b>2a</b>	-	-	+	-	-	-	+	-
<b>2b</b>	-	-	-	+	-	-	-	+

Figura 25: Secuencia para rotación horaria en motor PaP bipolar

### 2.1.3.2. Motor de corriente continua y alterna

A diferencia de los motores paso a paso, que son capaces de trabajar en un sistema de control de bucle abierto, los motores de corriente continua (Figura 26) o alterna no poseen esta capacidad, por lo que requieren de dispositivos que informen al circuito de control del posicionamiento del rotor. Esto eleva el coste del sistema, aspecto que reduce su uso para este ámbito. Como principales ventajas encontramos su bajo precio, una mayor potencia a igualdad de tamaño y un funcionamiento más suave.



Figura 26: Motor de corriente continua

Existen en el mercado una gran variedad de este tipo de motores (sin escobillas, asíncrono, síncrono, etc.). Dada la enorme variedad existente, detallaremos únicamente su principio de funcionamiento.

Los motores de corriente alterna y los de corriente continua se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético.

El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan, debido a la interacción con los polos ubicados en el estátor, el movimiento circular que se observa en el rotor del motor.

### 2.1.3.3. Motor lineal

El funcionamiento de un motor lineal deriva de un motor eléctrico convencional donde el estátor se encuentra abierto y “desenrollado” en ambos lados del carril-guía (Figura 27). Alterando la polaridad de las bobinas del elemento acoplado al rail conseguimos el movimiento del mismo.

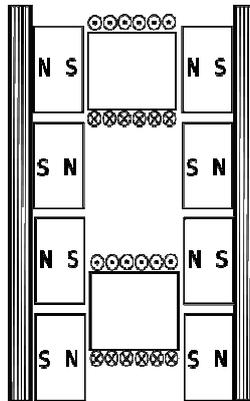


Figura 27: Motor lineal  
Fuente: <http://www.wikipedia.org>

Estos motores poseen una enorme capacidad de velocidad y aceleración. Además poseen una alta repetitividad. Entre sus principales desventajas se encuentra la necesidad de ser controlado por un sistema de bucle cerrado, problemas ante cargas pesadas y su elevado precio.

Existen también en el mercado motores lineales paso a paso (Figura 28). Estos motores solucionan el problema del sistema de control, ya que este tipo de motores sí pueden trabajar en bucle abierto.

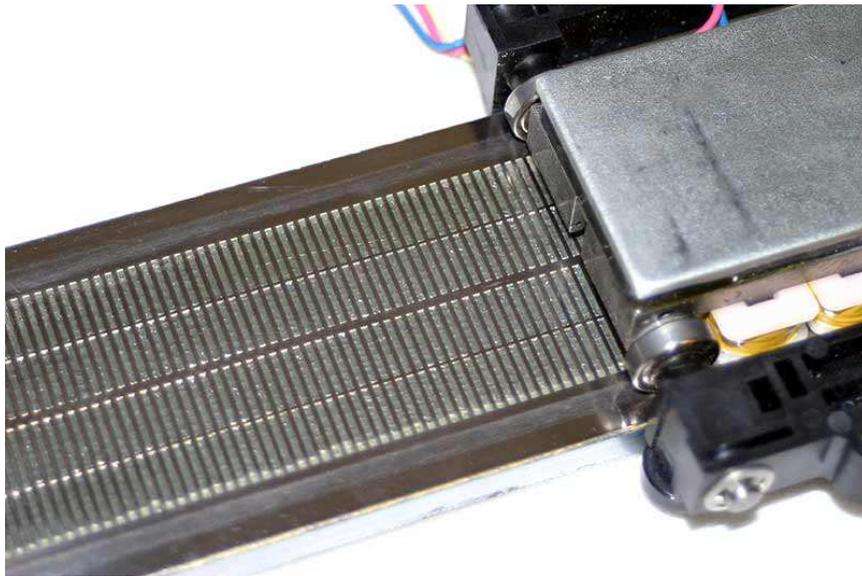


Figura 28: Motor lineal paso a paso  
Fuente: <http://www.fromorbit.com>

#### 2.1.4. Sistema de movimiento

En una máquina de control numérico el sistema de movimiento se corresponde con el conjunto de elementos responsables de transmitir o guiar los movimientos realizados por los actuadores.

Podemos clasificar estos elementos en dos tipos:

- Elementos activos: Transmiten el movimiento de los motores de los ejes a los elementos móviles.
- Elementos pasivos: Actúan como guía o rail de los elementos móviles.

### 2.1.4.1 Elementos activos

#### 2.1.4.1.1 Tuerca husillo

La tuerca husillo (Figura 29) es un tipo de mecanismo que está constituido por un tornillo (husillo) que al girar produce el desplazamiento longitudinal de la tuerca en la que va enroscado (movimiento rectilíneo).



Figura 29: Tuerca husillo

Fuente: <http://www.hpcgearsinternational.com>

El husillo posee un número de entradas ( $z$ ) o filetes de rosca característico, que es el número de hélices que se enroscan en paralelo sobre el núcleo del tornillo. Generalmente es 1, 2 o 3.

El paso de rosca ( $p$ ) es la distancia entre dos filetes consecutivos de una misma hélice. Habitualmente se mide en milímetros (mm). El paso de rosca es igual a la longitud que avanza el husillo en cada vuelta. La longitud ( $L$ ) que avanza la tuerca al girar el husillo se obtiene mediante la fórmula de la Figura 30.

$$L = p \cdot N$$

Figura 30: Fórmula de avance de la tuerca  
( $N$  = número de vueltas que gira el husillo)

La velocidad de avance se expresa, especialmente en máquinas-herramienta, en milímetros por minuto (mm/min) y se calcula multiplicando el paso de rosca  $p$  (en mm/rev) por la velocidad de giro  $n$  (en rev/min o rpm) (Figura 31).

$$A = p \cdot n$$

Figura 31: Fórmula de velocidad de avance

La longitud  $L$  es independiente del número de entradas ( $z$ ), porque el paso de rosca ya indica los mm que avanza la tuerca por cada revolución del husillo.

Existen diferentes tipos de rosca en función de la forma del perfil del filete, del número de filetes que tenga, del paso de la propia rosca, y del sentido de giro de avance del tornillo. En cuanto al sentido de giro de la rosca, normalmente el avance se produce girando la rosca a la derecha, mientras que el retorno se produce girando la rosca a la izquierda. También existen tornillos y tuercas que funcionan en sentido inverso.

El tipo de rosca de estos husillos es diferente a la de los tornillos normales, porque además de tener un paso muy grande su perfil puede variar.

Los husillos de rosca cuadrada (Figura 32) son los más eficientes, ya que son los que menos fricción presentan en funcionamiento. Gracias a ello se pueden usar para mover grandes cargas. Como principal inconveniente encontramos la dificultad de mecanizar este tipo de roscas, y por tanto, su elevado precio.



Figura 32: Husillo de rosca cuadrada

La rosca ACME es un tipo de rosca trapezoidal que presenta un ángulo de  $29^\circ$  (Figura 33), lo que lo hace más fácil de mecanizar que los husillos de rosca cuadrada (aspecto que reduce su precio). Este tipo de rosca no es tan eficiente como la rosca cuadrada, ya que el ángulo que presenta incrementa la fricción. Este tipo de rosca es el más usado en máquinas CNC.

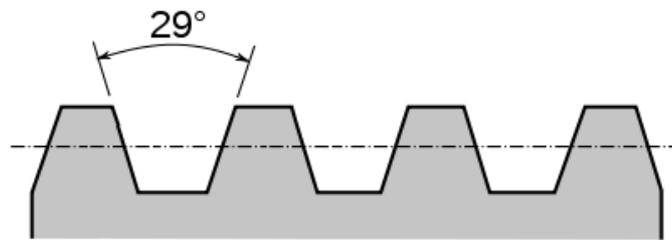


Figura 33: Husillo de rosca ACME

Entre las principales ventajas del uso de la tuerca husillo encontramos su bajo coste, la propiedad de ser autobloqueante si el ángulo de la rosca del husillo es lo suficientemente pequeño (la única forma de mover linealmente la tuerca será girando el husillo) y su bajo coste de mantenimiento. También presentan una baja sonoridad en funcionamiento. Como principales desventajas encontramos su escasa eficiencia (entre el 25 y el 70%) debida a la fricción. Esta fricción produce el calentamiento de sus elementos (no se recomienda para trabajos de larga duración a altas velocidades) y un rápido desgaste.

#### 2.1.4.1.2 Husillo de bolas

El husillo de bolas presenta un surco helicoidal por el que las bolas circulan al producirse el movimiento rotativo del husillo (Figura 34). La tuerca es la responsable de contener todas las bolas, por lo que contendrá un sistema de recirculación interna de las mismas.



Figura 34: Husillo de bolas

Fuente: <http://www.ballscrowdetail-online.info>

Las principales ventajas de este tipo de husillos son su altísima eficiencia (aproximadamente del 90%), un bajo coste de mantenimiento y una alta precisión. Su alta eficiencia lo hace apto para trabajos de larga duración a altas velocidades. También le permite trabajar con grandes cargas. La escasa holgura que presenta lo hace muy buena opción ante trabajos de precisión.

Entre los principales inconvenientes encontramos un mayor coste frente al husillo convencional, así como de no disponer de la propiedad de ser autobloqueante salvo para distancias de paso muy pequeñas.

#### 2.1.4.1.3 Piñón-cremallera

Este sistema transforma el movimiento rotativo del piñón en un desplazamiento lineal sobre la cremallera (Figura 35). Los dientes del piñón impiden que el mismo rote sin desplazarse, aspecto indispensable para su uso en máquinas de control numérico.



Figura 35: Piñón-cremallera

Fuente: <http://www.moderncastings.com>

Como ventajas presenta su bajo precio, la posibilidad de cubrir grandes distancias (para máquinas de grandes dimensiones) y un bajo coste de mantenimiento. Su principal desventaja es su menor precisión, causada por las holguras presentes entre el piñón y la cremallera. También presenta el inconveniente de no ser autobloqueante, lo que supone un problema cuando la cremallera se encuentra colocada verticalmente. Es una alternativa económica muy usada en máquinas CNC.

#### 2.1.4.1.4 Correa dentada

Sistema muy similar al piñón-cremallera en el que se sustituye la cremallera por una correa dentada (Figura 36). Los dientes de la correa impiden el libre deslizamiento de la misma.

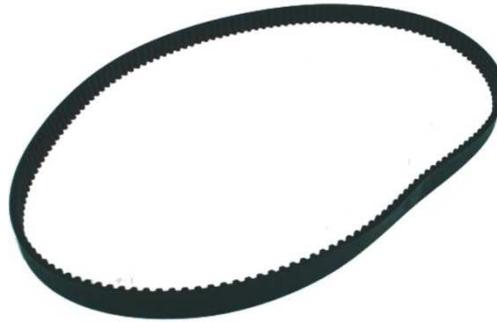


Figura 36: Correa dentada  
Fuente: <http://www.siluj.com>

Entre sus principales ventajas encontramos su bajo precio, su baja sonoridad en funcionamiento y un coste de mantenimiento muy bajo. Al igual que el piñón-cremallera, presenta el inconveniente de las holguras, lo que reduce su precisión. Además debemos de tener en cuenta la deformación elástica propia de la correa, lo que incrementa más aún su imprecisión. Al igual que el piñón-cremallera, no es un sistema autobloqueante.

Podemos encontrar este sistema de transmisión en prácticamente todas las impresoras domésticas, dispositivo que no requiere una gran precisión pero sí una baja sonoridad y coste.

### 2.1.4.2 Elementos pasivos

#### 2.1.4.2.1 Rodamientos

Un rodamiento (Figura 37) es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste por medio de la rodadura, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.



Figura 37: Rodamiento

Fuente: <http://www.directindustry.es>

Los rodamientos son elementos que encontramos en la práctica totalidad de máquinas de control numérico. Esto se debe a su bajo coste, su bajo coeficiente de rozamiento y la práctica ausencia de holguras. Su principal función consiste en la sujeción de los husillos (ya sean convencionales o de bolas) así como dentro los motores para posicionar correctamente el rotor. Para el ámbito del control numérico estos rodamientos presentan un recubrimiento que protege las bolas, de forma que la suciedad generada al mecanizar no pueda entrar a la zona de rodadura.

Otro elemento también ampliamente usado es el rodamiento lineal. Éste es un elemento muy útil cuando queremos desplazar un elemento de forma eficiente y precisa por una guía. Requiere de una guía tubular sobre la que desplazarse. Presenta las mismas ventajas que el rodamiento convencional, lo que también ha favorecido su amplio uso. Al igual que en los rodamientos convencionales, podemos encontrar rodamientos lineales con protección contra la suciedad.



Figura 38: Rodamiento lineal

Fuente: <http://web.tradekorea.com>

### 3. Estado del arte

En el presente capítulo se realiza un estudio de las soluciones ya existentes tanto de máquinas de control numérico como de aplicaciones similares a PantoMax, analizando sus ventajas e inconvenientes.

#### 3.1. Máquina de control numérico

En primer lugar se realizará un estudio de las soluciones encontradas en la red. Una vez realizado este estudio se pasará al análisis de una solución comercial concreta.

##### 3.1.1. Estudio global de soluciones encontradas en la red

Internet ha permitido que aficionados al control numérico puedan compartir los diseños de las máquinas que han creado, creando también manuales y videos demostrativos. Tras un estudio de los diferentes diseños encontrados obtenemos las siguientes conclusiones:

- Muchas de las propuestas parten de la construcción de toda la estructura con madera. Este material es económico y fácilmente trabajable, aunque no es el más adecuado para la estructura de nuestra máquina, ya que al ser una material relativamente blando es propenso a deformaciones, y por tanto, a falta de precisión.
- Otras propuestas parten del reciclaje de la estructura y componentes de dispositivos como impresoras, escáneres y otros dispositivos similares. Aunque los componentes pueden ser totalmente válidos para la construcción de nuestra máquina, la propia estructura del dispositivo no se suele adaptar al diseño de la máquina deseada, por lo que requiere de grandes cambios que dan un aspecto poco profesional a nuestra máquina CNC.
- Algunas máquinas parten de fresadoras de columna de control manual. Estas máquinas únicamente requieren del acople de motores a los ejes para transformarse en máquinas de control numérico. El principal inconveniente de este tipo de solución es el elevado precio de estas fresadoras de columna. También presenta como desventaja un área de trabajo bastante reducida.
- Las propuestas más profesionales parten del trabajo con metales. Suelen utilizar diferentes tipos de perfiles que mediante uniones por soldaduras u otros métodos consiguen dar forma a la estructura de la máquina. Se requieren una gran cantidad de herramientas y habilidades para llevar a cabo estas propuestas.

- Otras soluciones con metales parten del uso de sistemas constructivos de perfiles de aluminio. Estos sistemas han sido diseñados para la construcción rápida y fácil de estructuras y máquinas. Estas propuestas no requieren de una gran cantidad de herramientas para su construcción. Se suele obtener un resultado profesional y su tiempo de fabricación es menor que en las propuestas convencionales.
- La mayor parte de propuestas son máquinas de dos o tres ejes, siendo poco frecuentes las propuestas de cuatro o cinco ejes.
- En lo que respecta a componentes:
  - Los motores más usados son los motores paso a paso, ya que pueden funcionar en un sistema de control de bucle abierto.
  - Para la transmisión del movimiento de los motores se usan sistemas de correas, piñón-cremallera, husillo-tuerca y husillos de bolas. Las propuestas más profesionales usan el husillo de bolas, aunque el husillo-tuerca es posiblemente el más usado (dado su bajo precio).
  - El uso de rodamientos es universal en todas las propuestas. En algunas se prescinde de los rodamientos lineales, usando rodamientos convencionales ajustados a un rail que impide su libre movimiento.
  - Se suelen recurrir a controladores de motores comerciales, aunque existen también propuestas con circuitería de control propia.
  - Los componentes que forman estas propuestas suelen ser adquiridos desde China vía internet. La razón reside en los bajos precios ofertados, así como en la gran variedad de componentes disponibles.

### 3.1.2. Estudio de una solución comercial: Marchant Dice Ltd.

Dada la creciente demanda de productos relacionados con el control numérico han surgido en la red una gran cantidad de tiendas especializadas en este ámbito. Estas tiendas disponen de cualquier componente necesario para la fabricación de una máquina de control numérico, ofreciendo también en algunas ocasiones kits con todos los componentes necesarios para la fabricación casera de la máquina. La solución presentada en este apartado (Figura 39) ha sido creada por una de estas tiendas (<http://marchantdice.com/>) con el fin de obtener una máquina de calidad a un precio razonable.

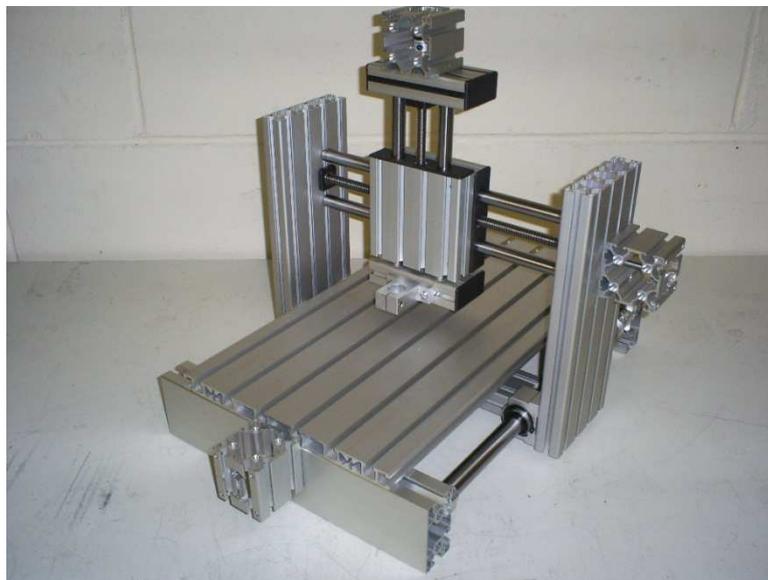


Figura 39: Kit de control numérico de Marchant Dice  
Fuente: <http://marchantdice.com/>

Las características de este kit son las siguientes:

- Uso de un sistema constructivo de perfiles de aluminio para toda la estructura de la máquina.
- Diseño simple pero robusto, usando poco material para formar toda la estructura.
- Máquina de 3 ejes con posibilidad de acoplar un cuarto eje.
- Uso de motores paso a paso híbridos con un paso de 1.8° y un torque de 1.35 N.m.
- Utilización de husillo de bolas en todos los ejes de la máquina. Podemos encontrar una versión más económica en la que se usa el sistema de tuerca-husillo.
- Disponen de áreas de trabajo de un tamaño similar al A4 y al A3, permitiendo el eje Z un desplazamiento total de 100 mm.
- Uso de rodamientos lineales sobre raíles cilíndricos. Por cada eje se usan 2 de estos raíles, siempre paralelos al husillo que transmite el movimiento.

- La sujeción del motor de un eje a la estructura de la máquina se realiza mediante un cubo de aluminio hueco. Es en el interior de este cubo donde se realiza la conexión entre el eje del motor y el husillo mediante un acople. El chasis del motor se encuentra en contacto directo con la estructura, lo que transmitirá a la máquina las vibraciones producidas por el motor.
- El coste de la máquina con área de trabajo de tamaño A3 y husillos de bolas en todos los ejes ronda los 1800€. La máquina se entrega totalmente desmontada, por lo que a este precio deberemos sumarle el coste del tiempo de montaje, así como de las herramientas necesarias para tal tarea.

A modo de resumen destacar que es una muy buena solución para aquellos que quieran una máquina de control numérico de una calidad más que aceptable a un bajo coste. A pesar de ello presenta algunos inconvenientes, como son las sujeciones de los motores o el escaso desplazamiento del eje Z.

### 3.2. Software de control manual

Aunque la propia definición de control numérico implique la automatización de máquinas-herramienta mediante comandos programados en un medio de almacenamiento, siempre se suele disponer de uno o varios controles manuales. Son muy frecuentes las ocasiones en las que debemos posicionar manualmente la máquina o simplemente queremos realizar un mecanizado manual, sin necesidad de tener que programar instrucciones de mecanizado.

El software usado para controlar la máquina suele contener en su interfaz los controles necesarios para esta tarea. En ella podemos ordenar a la máquina ir directamente a la posición introducida, así como ir desplazando cada uno de los ejes mientras mantengamos pulsado su correspondiente botón en la interfaz. Para este último caso también se usan otros dispositivos como teclados y joysticks (Figura 40) que se comunican con el software de control. Destacar que el uso de joysticks analógicos permite regular la velocidad de desplazamiento de la herramienta dependiendo del grado de inclinación del stick.



Figura 40: Joystick

Encontramos en el mercado una gran variedad de dispositivos de control manual especializados para máquinas CNC. Este tipo de dispositivo permite realizar todas las funciones de control manual posibles y suelen incluir un botón de emergencia que detiene totalmente la máquina (Figura 41).



Figura 41: Control manual especializado en CNC

Los controladores de máquinas de control numérico (intérpretes de código G) más conocidos entre aficionados son los controladores Mach3 y EMC2. Ambos controladores disponen de control manual, permitiendo una gran variedad de dispositivos para este fin.

El código G determina el tipo de operación a realizar en la máquina. Los códigos G seleccionan el tipo de movimiento, el modo de velocidad o de avance, etc. El intérprete de código G será el responsable de traducir estos códigos a señales entendibles por los controladores de los motores de la máquina.

Mach3 es el software de control numérico más usado por aficionados. Posee una licencia comercial, por lo que no se tiene acceso a su código fuente para añadir nuevas funcionalidades o mejorar el propio software. En la Figura 42 se muestra el control manual implementado para este controlador.



Figura 42: Control manual de Mach3  
Fuente: <http://www.machsupport.com/>

EMC2 es la segunda opción más usada. Es un controlador CNC de software libre que cuenta con una comunidad que colabora en el desarrollo y mantenimiento del mismo. Un punto fuerte de este controlador es que permite un diseño rápido de tu propio control manual, aunque éste se encuentra limitado a la pulsación de botones con el ratón o a eventos de teclado. En la Figura 43 se muestra un control manual implementado para este controlador.

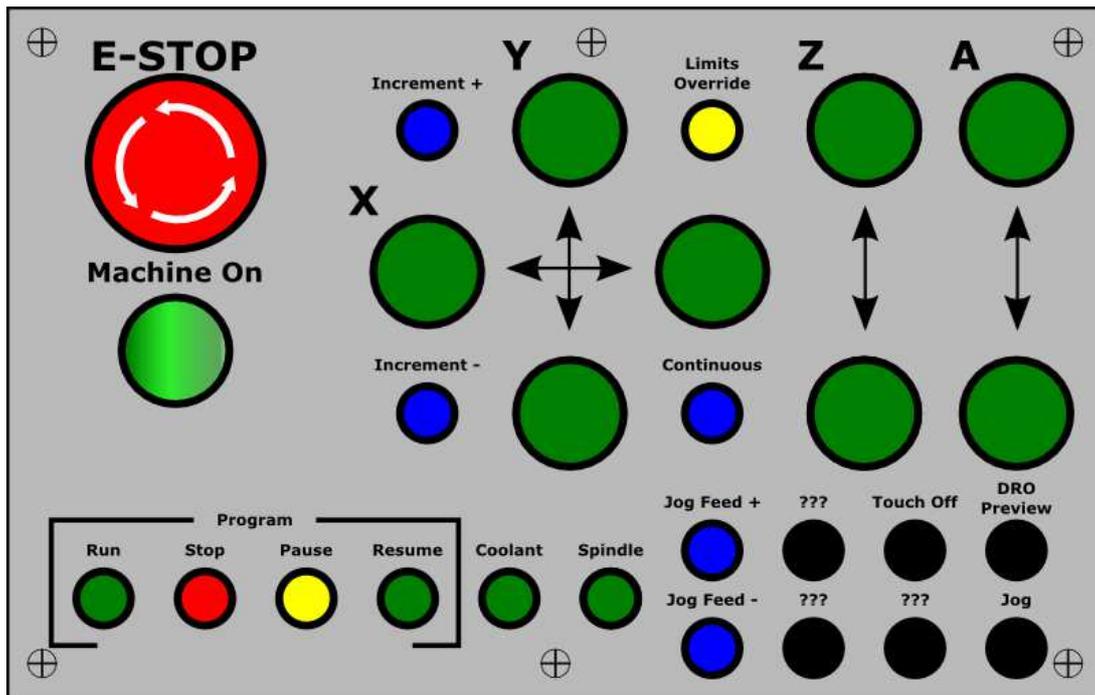


Figura 43: Control manual realizado para EMC2  
 Fuente: <http://electricalmusings.blogspot.com>

## 4. Especificación de requisitos

### 4.1. Máquina de control numérico

Los requisitos exigidos para la máquina de control numérico son:

- Fácil fabricación: Las únicas acciones de mecanizado permitidas sobre el material que formará la estructura serán cortes y taladrados.
- Gran área de trabajo: El área de trabajo se encontrará entre el tamaño del estándar DIN A2 y DIN A3. El eje Z contará con un desplazamiento total de más de 250 mm, permitiendo el futuro acoplamiento de un cuarto eje.
- Precisión para cualquier tarea: La resolución de posicionamiento será de un mínimo de 5  $\mu\text{m}$ , siendo el error de repetitividad no superior a los 10  $\mu\text{m}$ .
- Gran velocidad de desplazamiento: La velocidad de desplazamiento para cada uno de los ejes será superior a los 6000 mm/min.
- Máquina de sobremesa: La máquina debe encontrarse dimensionada para poder colocarse en una mesa de escritorio y ser lo suficientemente ligera para no deteriorar la misma por su peso.
- Bajo coste: El coste total de los componentes que forman la máquina será inferior a los 1500€ (se excluye la computadora que realiza la función de control de la máquina).

## 4.2. Aplicación gráfica de control manual

Los requisitos exigidos para el control manual de la máquina son:

- Aplicación para uso con dispositivo apuntador: Esta aplicación gráfica contendrá un área de dibujo sobre la que el usuario realizará trazados mediante un dispositivo apuntador. Estos trazados serán transmitidos a la máquina de control numérico.
- Si el dispositivo de entrada utilizado es una tableta gráfica, la presión ejercida será proporcional a la altura de la herramienta acoplada a la máquina.
- Integración con controlador máquina-herramienta: La aplicación de control manual desarrollada se integrará con un controlador de máquina-herramienta de código abierto.
- Control y monitorización en tiempo real: El control manual de la máquina y la monitorización de la posición de la herramienta acoplada será en tiempo real. En todo momento la aplicación mostrará la posición de la máquina y el diseño del usuario.
- Si la velocidad de posicionamiento de la máquina fuera inferior a la velocidad demandada por el usuario, se encolarían las acciones para ser realizadas más tarde. En la interfaz de usuario, un trazo de diferente color indicará el recorrido seguido por la máquina.
- Zoom vectorial: El usuario será capaz de realizar zoom en cualquier zona del área de dibujo, realizándose un escalado vectorial de dicha zona sin perder calidad.
- Capacidad de escalado: Gracias a la herramienta de zoom, el usuario podrá ampliar en el área de dibujo un área determinada del área de trabajo de la máquina.
- Guardado y carga del trabajo realizado: Se podrán guardar en disco los trazados realizados para su posterior carga en la aplicación.
- Guardado y carga de la configuración de la máquina: Al igual que con los trazados, se podrá guardar y cargar la configuración especificada para la máquina.
- Interfaz gráfica intuitiva: La aplicación dispondrá de una interfaz gráfica sencilla e intuitiva, permitiendo un rápido aprendizaje sobre el uso de la misma a personas no expertas en la materia.

## 5. Diseño

En el presente capítulo se proporcionan los diseños tanto de la máquina de control numérico como del control manual realizado, detallando su funcionamiento y la metodología de desarrollo seguida.

### 5.1. Máquina de control numérico

En lo que respecta a la máquina de control numérico, en primer lugar se detallará el diseño creado, describiendo también todos los materiales y herramientas necesarias. Tras esto, se procederá a describir paso a paso el proceso de fabricación seguido.

Se ha decidido el uso del software CAD (Computer-Aided Design) Google SketchUp para realizar el diseño de toda la parte física del proyecto. La Figura 44 muestra el diseño escogido para la máquina de control numérico.

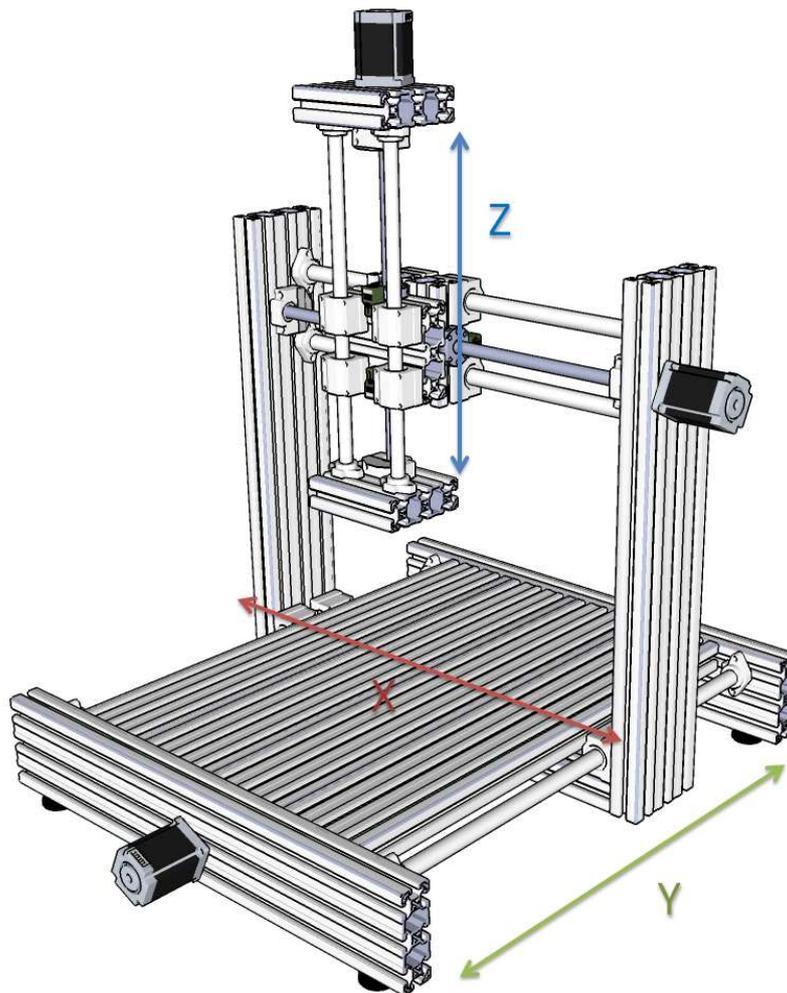


Figura 44: Modelado de máquina de control numérico

### 5.1.1. Materiales

Podemos apreciar como para toda la estructura de la máquina se ha usado un único perfil de aluminio cortado en diferentes medidas. Este perfil (Figura 45) forma parte de un sistema constructivo de perfiles de aluminio, que como ya habíamos tratado en el capítulo de estado del arte, agiliza el proceso de fabricación de máquinas y proporciona un acabado profesional. Los vendedores de estos sistemas constructivos suelen ofrecer al cliente el corte preciso de estos perfiles sin coste alguno.

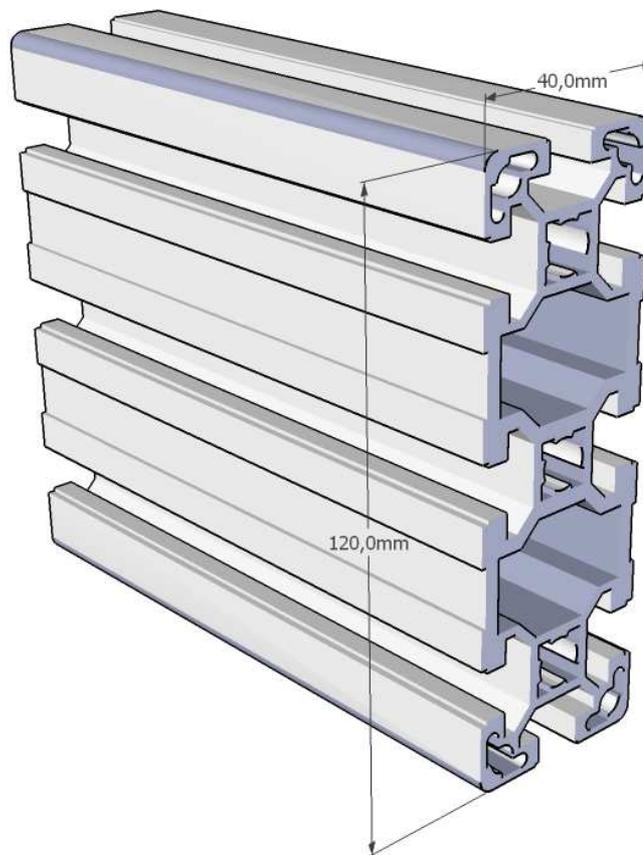


Figura 45: Perfil de aluminio constructivo

En lo que respecta al sistema de movimiento activo, se ha recurrido a husillos de bolas 1605 con una tolerancia de clase 7 del estándar DIN 69051 (Figura 46). El diámetro de estos husillos es de 16 mm, con un paso de 5 mm y una longitud dependiente del recorrido del eje. Estos husillos requieren del mecanizado de sus extremos para poder ser acoplados a los soportes correspondientes. Para realizar este mecanizado se hace necesario un torno de precisión, por lo que se recomienda adquirir estos husillos ya mecanizados por el vendedor. El mecanizado es siempre el mismo para este tipo de husillos, por lo que no es necesario especificar ningún dato al vendedor salvo la longitud del propio husillo.

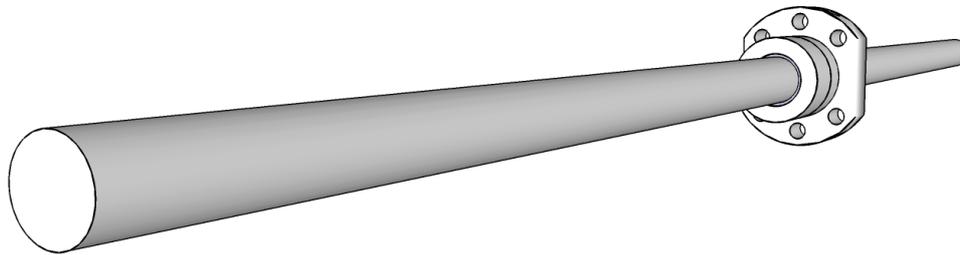


Figura 46: Husillo de bolas 1605

Como sistema de movimiento pasivo se han usado los siguientes componentes:

- Bloques con rodamientos para el soporte de los husillos: Estos bloques realizan la función de sujetar los husillos y permitir el movimiento rotacional del mismo. Los orificios que contienen permiten su instalación tanto en horizontal como en vertical. Cada eje contendrá dos bloques distintos. En el extremo del actuador se encuentra el bloque con nombre comercial BK12 (Figura 47), un bloque que impide el movimiento longitudinal del husillo. En el otro extremo se usará el bloque BF12 (Figura 48), bloque que permite un movimiento longitudinal. Debido a que el bloque BK12 bloquea el movimiento longitudinal del husillo, no existe ningún problema en que el bloque del otro extremo sí lo permita. Ambos bloques poseen una tolerancia de clase 7 del estándar DIN 69051.

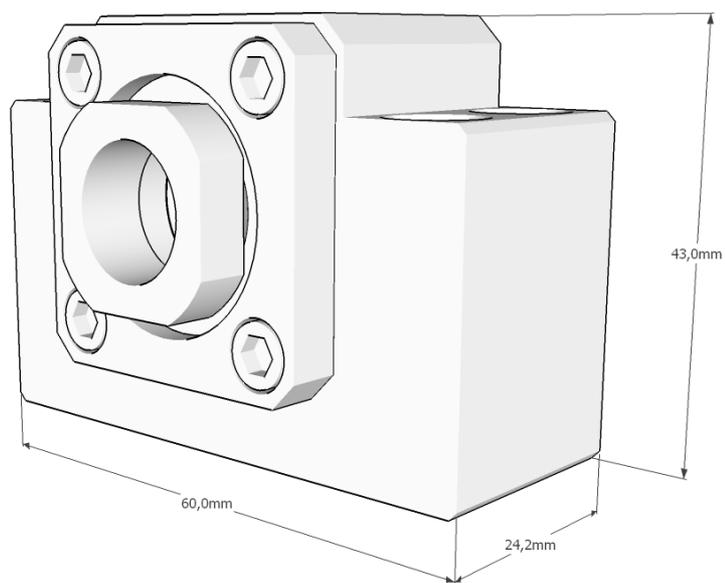


Figura 47: Bloque BK12

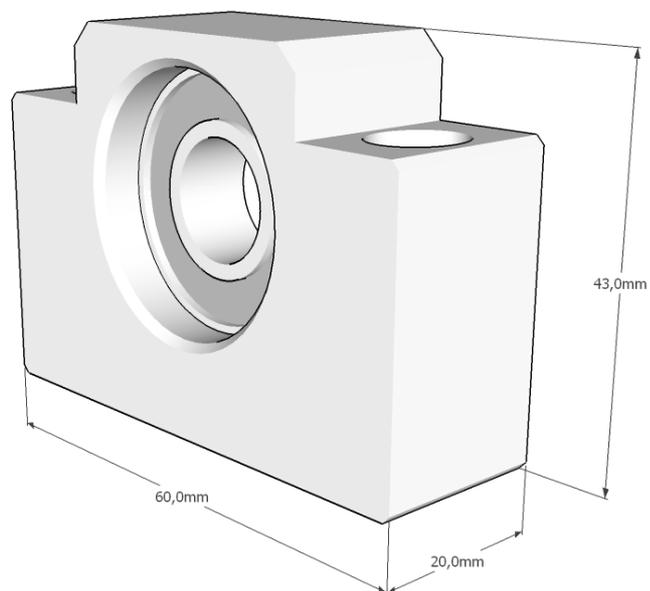


Figura 48: Bloque BF12

- Rodamientos lineales sobre raíles cilíndricos: El diámetro de estos raíles de acero al carbono varía dependiendo del eje del que forme parte. Para el eje X e Y se ha elegido un diámetro de raíl de 20 mm, mientras que para el eje Z usa un diámetro de 16 mm. Esta elección se debe a que los ejes X e Y soportan más peso, hecho que junto a la posición horizontal de los mismos hace que puedan flexionarse si el raíl no es lo suficientemente ancho.

Los rodamientos lineales se encuentran dentro de un bloque de aluminio con 4 orificios que permiten su acople a cualquier superficie mediante tornillos. Estos bloques son de distinto tamaño para los rodamientos lineales de 20 mm y 16 mm. El nombre comercial de estos bloques es SC20UU para los bloques de 20 mm (Figura 49) y SC16UU para los de 16 mm (Figura 50).

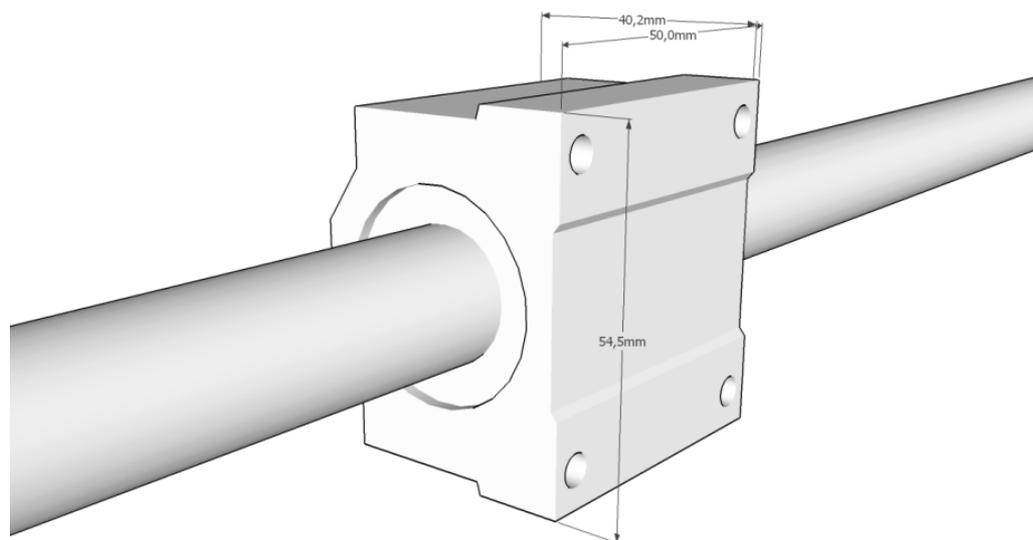


Figura 49: Bloque SC20UU

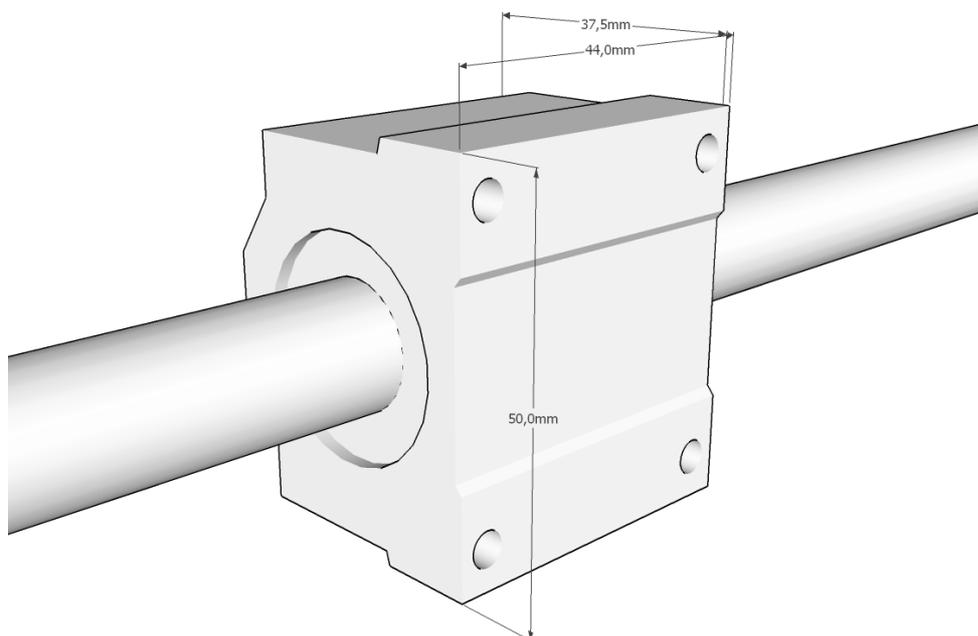


Figura 50: Bloque SC16UU

Como actuadores se han usado tres motores paso a paso 57BYGH408 (Figura 51). Poseen las siguientes características:

- Motor bipolar de 2 fases.
- Ángulo de paso de  $1.8^\circ$  (200 pasos por vuelta).
- Error de precisión por paso de  $\pm 5\%$  (lo que nos da un error no acumulativo de  $\pm 0.09^\circ$  por paso).
- Cumple el estándar Nema 23 (determina el ancho y alto del motor pero no su profundidad).
- Par máximo de 21 kg.cm o 2.06 N.m (este alto par permite el rápido movimiento de los ejes).
- Holgura radial del eje de 0.02 mm máximo (es la holgura que tiene el eje del motor con respecto a su centro).
- Holgura longitudinal del eje de 0.3 mm máximo.
- Cada bobina tiene una intensidad nominal de 3 A.
- Eje de 6.35 mm de diámetro.
- Peso de 1.5 Kg.

Podemos observar como los datos de holguras para estos motores son considerablemente altos. Debido a que estos motores se encuentran acoplados a los husillos, serán las sujeciones de estos últimos los que determinen la holgura final del conjunto.

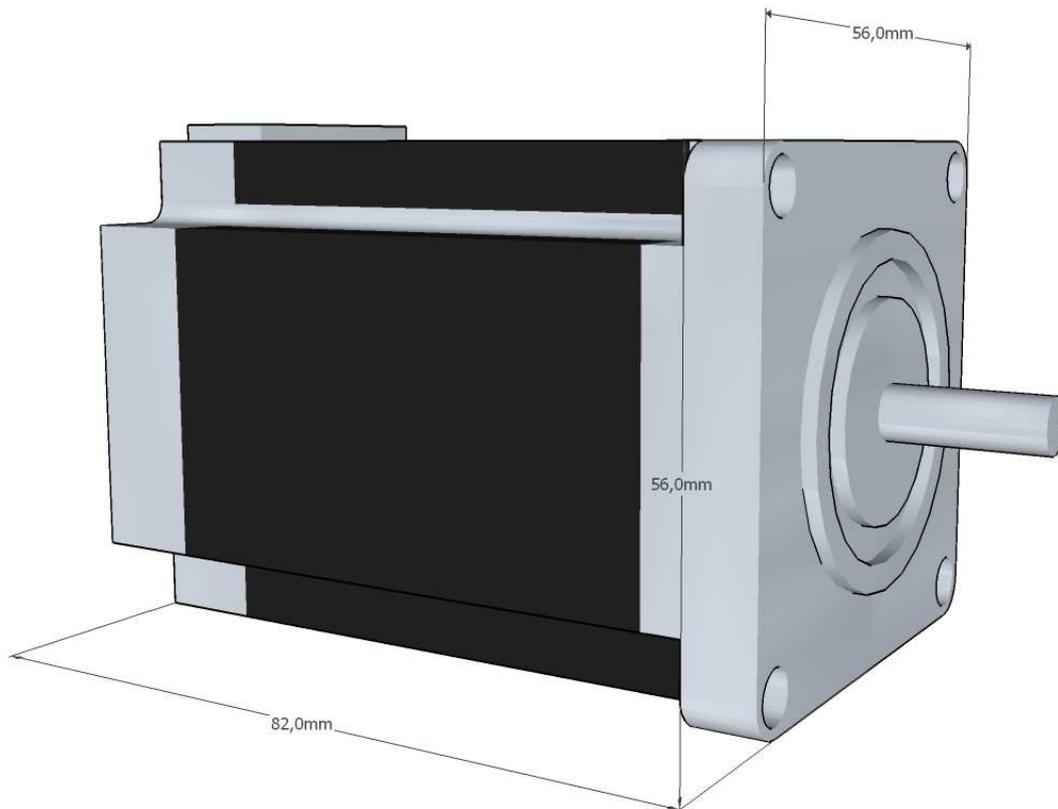


Figura 51: Motor paso a paso 57BYGH408

Para la sujeción de las guías cilíndricas se ha recurrido a soportes de aluminio con orificios para instalación mediante tornillos. Dado que se usan guías con diferente grosor, se usarán soportes comerciales SHF20 para las guías de 20 mm (Figura 52) y SHF16 para las de 16 mm (Figura 53).

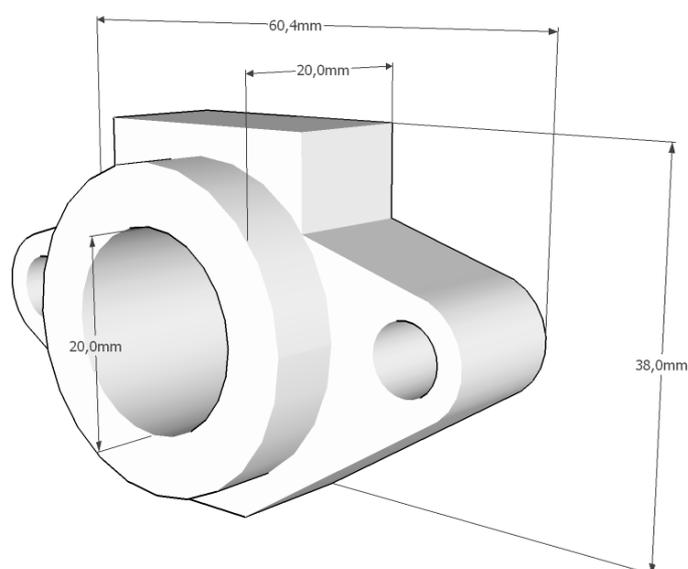


Figura 52: Soporte SHF20

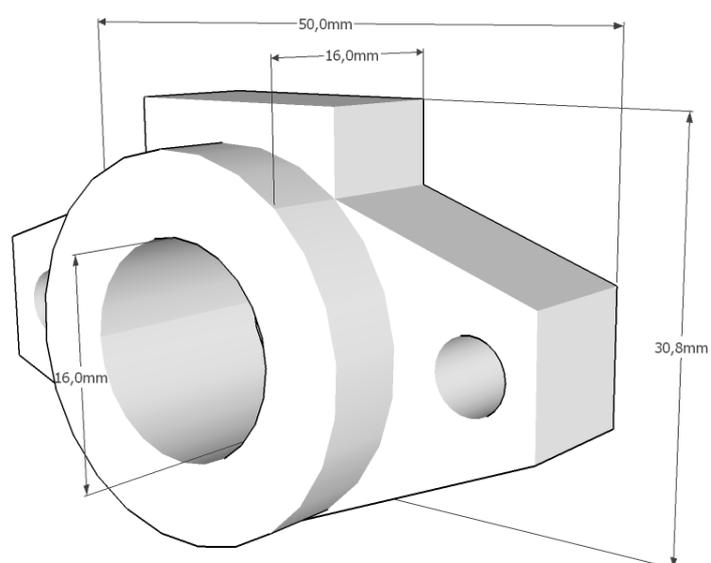
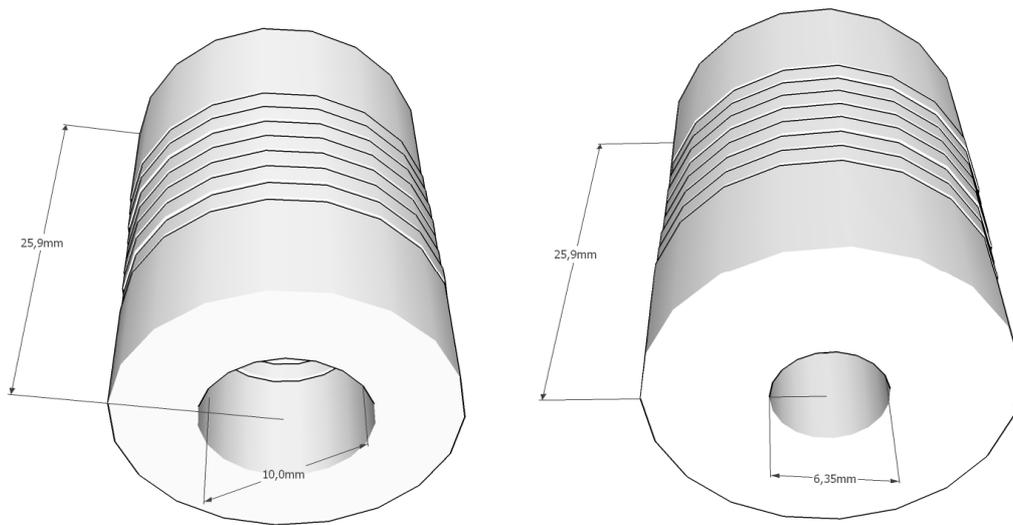


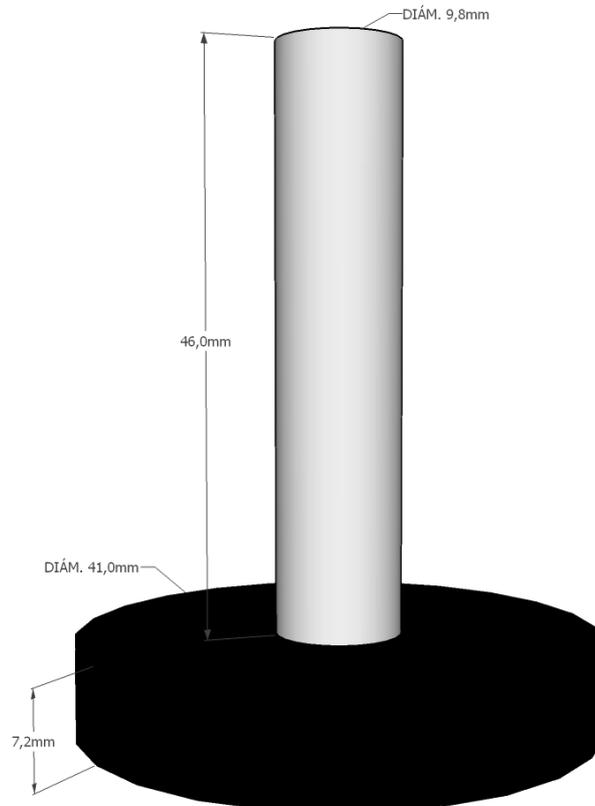
Figura 53: Soporte SHF16

La unión entre el eje del rotor de los motores paso a paso y el husillo de bolas se realiza mediante un acoplador de aluminio con una franja flexible que permite cierta desalineación entre ejes (Figura 54). Dado que el eje del motor tiene un diámetro diferente al husillo, este acoplador tiene en cada extremo una cavidad del diámetro del objeto a acoplar. Dispone de 4 pequeños tornillos (no modelados) que presionan los ejes y fijan por tanto la unión de los mismos.



**Figura 54: Acoplador husillo-motor**

Para el soporte de la máquina se recomienda el uso de patas regulables en altura (Figura 55), ya que es frecuente que la superficie dedicada a la misma no sea totalmente plana o no se encuentre correctamente nivelada. El tornillo con el que cuentan estas patas nos permitirá regular la altura girando las mismas (es necesario realizar un roscado hembra en los perfiles).



**Figura 55: Pata regulable en altura**

Aunque no imprescindible, es muy recomendable el uso de finales de carrera para todos los ejes. Esto evitará la rotura de componentes (en nuestro caso el acoplador entre el motor y el husillo, ya que al ser un elemento flexible también es el más débil). También nos servirá para detectar la coordenada de inicio de la máquina ( $X=0$ ,  $Y=0$ ,  $Z=0$ ), agilizando todos los procesos de fabricación. Los finales de carrera convencionales tienen el inconveniente de que con el uso frecuente sus piezas de contacto se deforman, introduciendo un error en el posicionamiento de inicio. Es por ello que para este proyecto se han optado por finales de carrera inductivos (modelo comercial SN04-N) (Figura 56). Estos dispositivos tienen el mismo principio de funcionamiento que los detectores de metales, por lo que no necesitan de un contacto físico para su funcionamiento. Esto produce que estos dispositivos cuenten con una repetitividad excelente, lo que hace adecuado su uso en tareas de precisión.

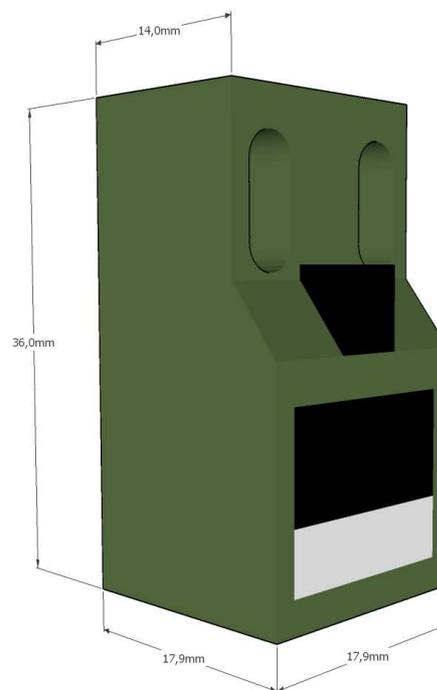
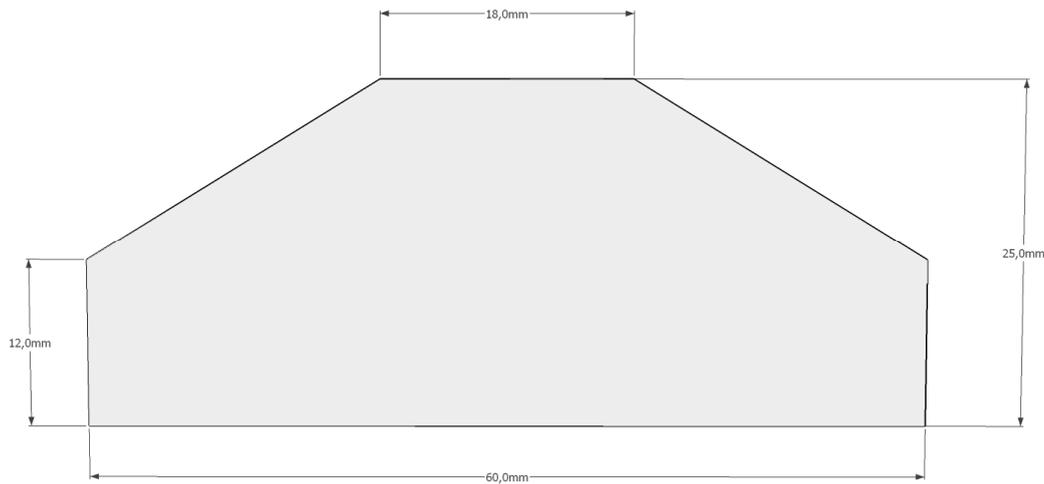


Figura 56: Final de carrera SN04-N

Poseen las siguientes características:

- Frecuencia de respuesta de 500Hz (lo que supone un retardo máximo de 2 milisegundos).
- Tensión de alimentación entre 6 y 36V.
- Distancia de detección: 5 mm.
- Tres cables de conexión: Alimentación, masa y salida lógica normalmente abierta.

Estos sensores únicamente detectan materiales ferrosos, por lo que debemos colocar en los extremos de los ejes este tipo de material. Por el diseño escogido y la distancia que estos sensores son capaces de detectar, tanto los perfiles de aluminio como los soportes de los husillos quedan demasiado retirados. Para solucionar este problema se ha optado por la fabricación de la pieza de la Figura 57 a partir de chapa galvanizada de 0.7 mm de grosor.



**Figura 57: Chapa final de carrera**

Estas piezas se colocarán en los soportes del husillo mediante los orificios con los que ambos cuentan (no modelados). Para su fabricación recurriremos a tijeras específicas para el corte de chapa.

La tornillería necesaria para la fijación de todos los componentes descritos a los perfiles de aluminio se reduce únicamente a tornillos de tipo rosca-chapa del número 7 (3.9 mm), 10 (4.8 mm) y 12 (5.5 mm). La decisión de optar por este tipo de rosca reside en el ahorro del coste de las herramientas necesarias para realizar el roscado así como de la reducción del tiempo requerido para realizar las fijaciones. La longitud de los mismos depende del elemento a fijar, lo que hace que necesitemos de una considerable variedad de tornillos. Una solución para este problema consiste en adquirir tornillos de gran longitud y acortarlos mediante una mini-amoladora a nuestras necesidades.

La unión entre los perfiles de aluminio se realiza mediante tornillos y tuercas de gran grosor, ya que serán estos elementos los responsables de fijar toda la estructura. Los elementos usados para este fin son los siguientes:

- Tornillo con cabeza Torx T50, 30 mm de longitud y 12 mm de diámetro. Podemos encontrar estos tornillos en dos modalidades, los que requieren de un roscado previo del material donde van a ser atornillados y los que no. Dado que el precio de ambos tornillos es similar, se recomienda el uso de los segundos para evitar incrementar el coste total de la máquina.

- Tornillo con cabeza en forma de T de 20 mm de longitud y 8 mm de diámetro con tuerca acorde a rosca y diámetro del tornillo. Los tornillos con este tipo de cabeza son específicos para este tipo de sistemas constructivos, ya que la cabeza se adapta a las diferentes cavidades que presentan los perfiles. Esto los hace difícil de adquirir fuera de nuestro proveedor de perfiles.

Los motores paso a paso presentan muchas ventajas para el uso en máquinas de control numérico, pero presentan también muchas vibraciones en funcionamiento. Por ello se ha decidido usar arandelas de caucho (ampliamente usadas en fontanería) (Figura 58) para la fijación de los motores a los perfiles con el fin de reducir la transmisión de estas vibraciones.

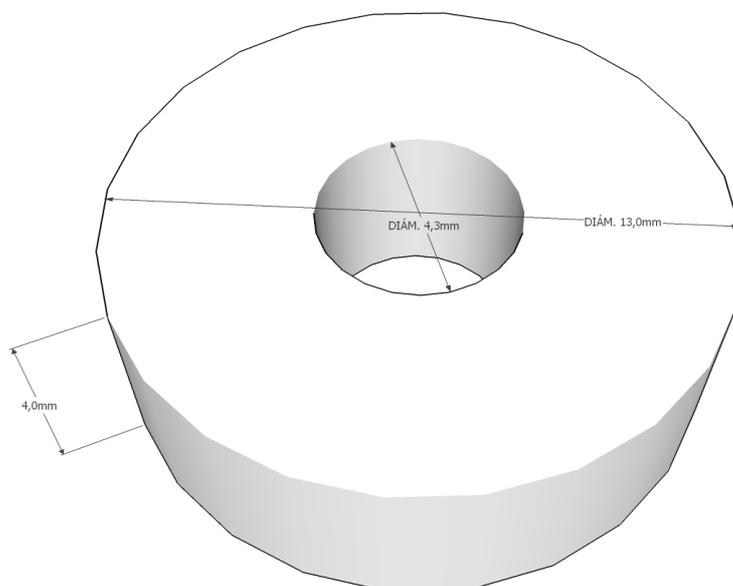


Figura 58: Arandela de caucho

Será necesario cablear tanto motores como sensores para su correcto control. Para ello se recurre a un cable de 4 hilos con una sección de cobre de  $1.5 \text{ mm}^2$  por hilo en el caso de los motores y de  $0.20 \text{ mm}^2$  para los finales de carrera. Para el correcto conexionado de los motores a estos cables se recurre a regletas de conexión (frecuentemente utilizadas en instalaciones eléctricas). Estas regletas se encontrarán fijadas al perfil de aluminio en una zona próxima al motor a conectar. En el caso de la prolongación de las conexiones de los finales de carrera se utilizará soldadura con estaño y funda termo-retráctil (esta funda aísla eléctricamente la soldadura y mejora su estética).

Para la protección de todo el cableado se aprovecharán las cavidades que nos proporcionan los perfiles de la estructura. Además, en las zonas en las que esto no sea posible, se usarán bridas y ordena-cables. Destacar que esta protección no sólo reduce el riesgo de accidentes sino que también mejora la estética global de la máquina.

En lo que respecta a la electrónica de la máquina, se hará uso de tres controladoras comerciales GeckoDrive G251X (una por cada motor) (Figura 59) y una tarjeta MB-02-V6 que realizará de interfaz entre estas controladoras, los finales de carrera y nuestro intérprete de código G.



Figura 59: Controladora GeckoDrive G251X  
Fuente: <http://www.geckodrive.com/>

Las características más relevantes de estas controladoras son:

- Intensidad máxima de 3.5 A por bobina.
- Voltaje de alimentación máximo de 50V.
- Entradas compatibles con lógica de 3.3 y 5V.
- Frecuencia máxima de señal de paso de 300Khz
- MicroStepping de diez micropasos. La razón de que sea diez y no otro número es que el error (no acumulativo) de los motores paso a paso suele ser de un +/-5% por paso. Esto hace que el motor tenga un rango de error del 10% de 1.8º, es decir, 0.18º. Esto se traduce en que el motor tiene la suficiente precisión como para avanzar de 0.18º en 0.18º. Si dividimos 360º (una vuelta completa) entre esta última cifra, nos da que somos capaces de colocar el eje del motor en 2000 posiciones diferentes. Los motores usados son de 200 pasos por vuelta, por lo que si usamos un microstepping de 10 micropasos obtendremos las 2000 posiciones anteriormente calculadas.

Destacar que previa a la decisi3n del uso de estas controladoras el autor realiz3 su propia controladora de motores paso a paso centr3ndose en fiabilidad, potencia y precio. Para conseguir esto se bas3 en un dise1o bastante probado consistente en dos L6203 (Puente H) y un L297 (Controladora de motores paso a paso) por cada motor. Esto hace que para el control de todos los motores de la m3quina se requieran seis L6203 y tres L297.

Las caracter3sticas m3s destacables de los L6203 es que soportan una intensidad de 4A, un voltaje de 48V y una alta frecuencia de conmutaci3n (100 KHz), lo que permite un correcto control de la intensidad que circula por las bobinas del motor. Son necesarios dos L6203 por motor debido a que necesitamos un puente H por cada bobina. Con respecto al L297 decir que permite regulaci3n de la intensidad (este controlador lee la intensidad desde los L6203), es capaz de realizar un microstepping de "medio paso" y traduce las se1ales de paso, direcci3n de giro y habilitado/deshabilitado provenientes del int3rprete de c3digo G. La Figura 60 muestra el esquema para el control de un solo motor.

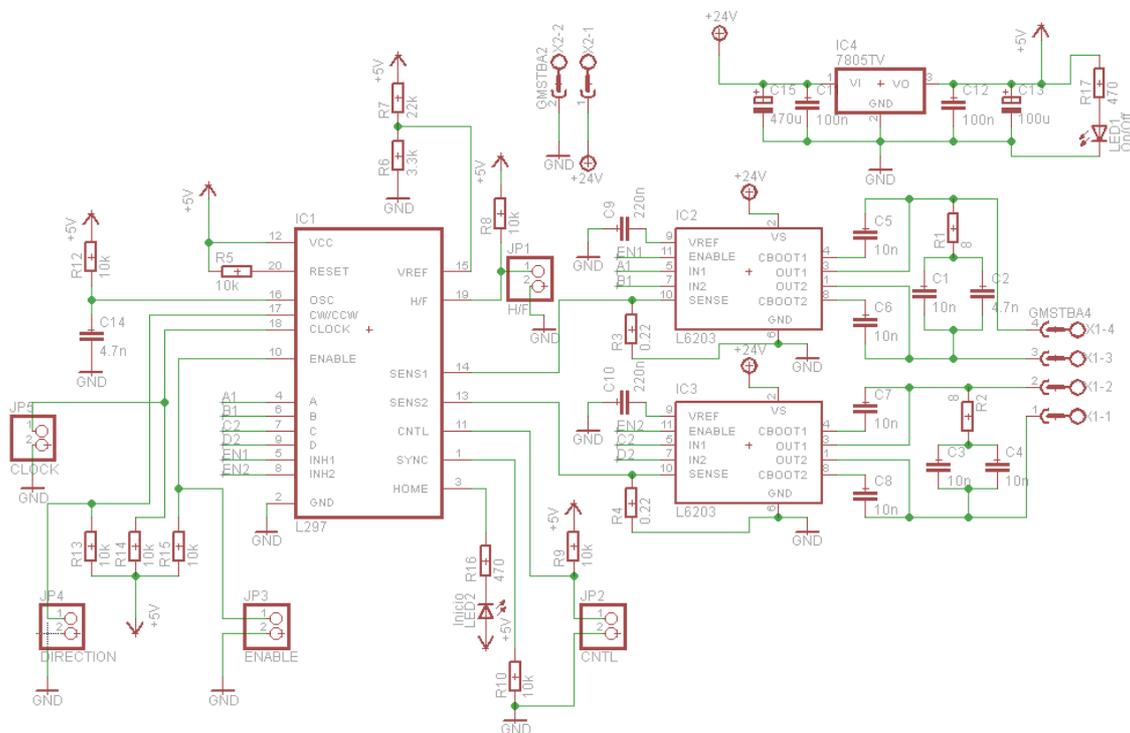


Figura 60: Esquema de controladora

Para la alimentaci3n de la l3gica de los integrados se ha optado por un regulador de voltaje a 5V (7805). El resto de componentes son condensadores (para protecci3n y filtrado de posibles ruidos), resistencias, conectores y un led indicador de encendido. La Figura 61 muestra el circuito impreso realizado de este esquema.

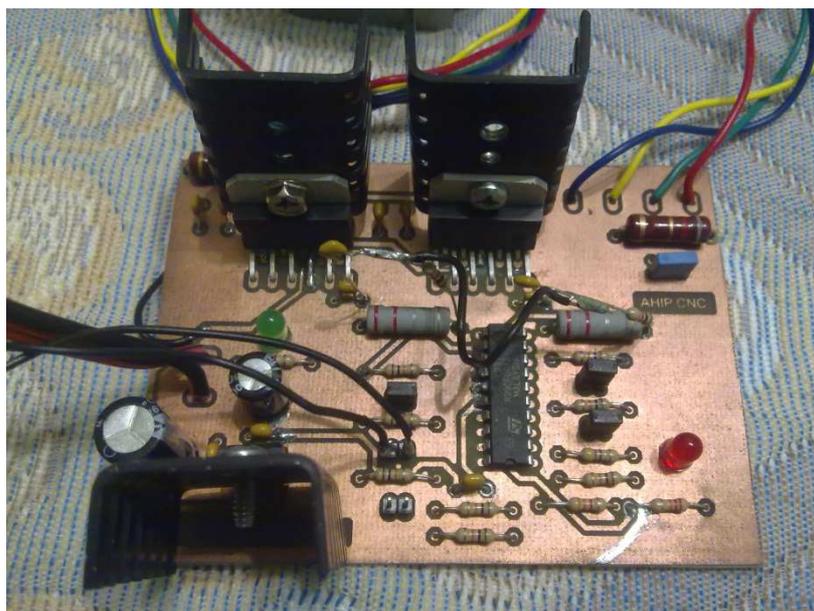


Figura 61: Circuito impreso realizado

Como se puede apreciar en la Figura 61 se han hecho diversos parches al circuito impreso para intentar solucionar el principal problema que se ha encontrado para esta controladora, que es la pérdida de pasos para un rango de frecuencias determinado. Esta pérdida de pasos muy probablemente provenga de un problema de resonancia a frecuencias medias. Es por ello que la característica más importante de las controladoras G251X usadas es su mecanismo de compensación de resonancia a frecuencias medias, lo que soluciona el problema de pérdida de pasos.

La tarjeta MB-02-V6 (Figura 62) realiza de interfaz entre las controladoras, los finales de carrera y el intérprete de código G.

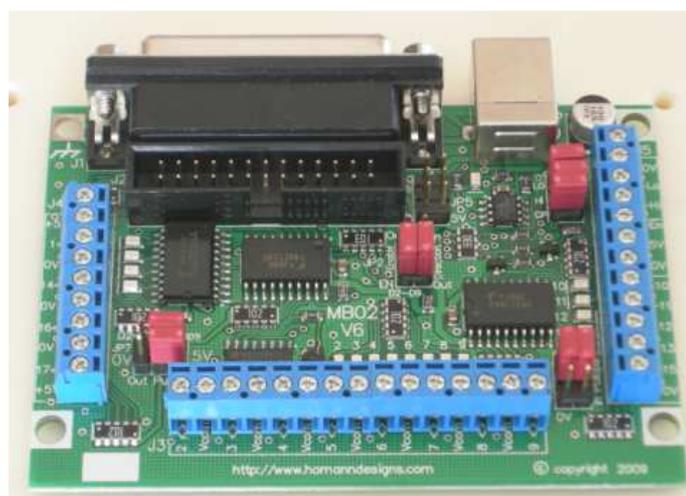


Figura 62: Tarjeta MB-02-V6

Fuente: <http://www.homanndesigns.com/>

Sus características más relevantes son:

- Voltaje de alimentación de 5V (pueden ser obtenidos de un puerto USB o de una fuente de alimentación)
- Puerto paralelo como interfaz de conexión con el intérprete de código G. La razón de no usar un protocolo como USB se debe a que este último es un protocolo asíncrono y por lo tanto incapaz de proporcionar un control en tiempo real puro.
- Resistencias de Pull-up en todas las entradas y salidas, asegurando un estado lógico válido.
- Entradas compatibles con lógica de 3.3 y 5V.
- Entradas y salidas configurables para ser activos por nivel alto o nivel bajo.
- Entradas y salidas capaces de proporcionar una intensidad de 24 mA (intensidad de señal requerida para nuestras controladoras).
- Pines comunes configurables a 0 ó 5V.
- Leds en todos los pines del puerto paralelo, lo que nos informa de las señales recibidas/enviadas en todo momento.
- Cuenta con la siguiente configuración de pines:
  - Bidireccionales (configurables vía jumper): 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9
  - Entrada: 10, 11, 12, 13 y 15
  - Salida: 1, 14 ,16 y 17

Como ya se ha tratado en el capítulo de antecedentes, una alta tensión de alimentación en los motores permite incrementar la velocidad de funcionamiento de los mismos. En este proyecto se ha optado por una fuente de alimentación (Figura 63) encargada de transformar corriente alterna con un voltaje de 220V a corriente continua de 48V DC. Esta fuente de alimentación es capaz de proporcionar 7.3A a 48V, por lo que su potencia total es de 350W.



Figura 63: Fuente de alimentación de 48V DC

Destacar que el límite de voltaje de las controladoras de los motores se encuentra en los 50V, por lo que la fuente de alimentación escogida se adecúa correctamente a estos dispositivos. No sucede así con los finales de carrera, cuya tensión de alimentación se encuentra entre los 10 y 30V. Para solucionar esta diferencia de tensión se ha recurrido a un regulador LM2576HVT-ADJ. Este integrado es capaz de recibir una alimentación en corriente continua de hasta 60V y transformarla a un rango de 1.23 a 57V con una intensidad máxima de 3A. La tarjeta responsable de la interfaz con nuestro intérprete de código G requiere de una tensión de alimentación de 5V, tensión obtenida mediante una conexión USB a nuestro intérprete. Destacar que esta conexión USB únicamente se utiliza para obtener los 5V necesarios para la alimentación de la tarjeta, no transmitiéndose ningún tipo de dato por el mismo.

En la

Material	Longitud	Cantidad	Proveedor	País	Coste unitario (Sin impuestos)	Coste total (Sin impuestos)
Perfil aluminio 40x120 mm	670 mm	6	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	19,12 €	114,72 €
Perfil aluminio 40x120 mm	589 mm	1	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	16,81 €	16,81 €
Perfil aluminio 40x120 mm	650 mm	2	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	18,55 €	37,10 €
Perfil aluminio 40x120 mm	140 mm	3	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	3,99 €	11,97 €
Perfil aluminio 40x120 mm	150 mm	1	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	4,28 €	4,28 €
Husillo de bolas 1605 clase 7 (incluye mecanizado)	686 mm	1	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	49,42 €	49,42 €



Husillo de bolas 1605 clase 7 (incluye mecanizado)	605 mm	1	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	43,58 €	43,58 €
Husillo de bolas 1605 clase 7 (incluye mecanizado)	453 mm	1	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	32,64 €	32,64 €
Soporte BK12 + BF12 clase 7 para husillo 1605	--	3	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	39,58 €	118,74 €
Rodamiento lineal SC20UU	--	8	eBay (Vendedor: iwannebuy)	China	5,49 €	43,92 €
Rodamiento lineal SC16UU	--	4	eBay (Vendedor: iwannebuy)	China	5,18 €	20,72 €
Guía cilíndrica de precisión 20 mm diámetro	660 mm	2	Marchant Dice LTD. ( <a href="http://www.marchantdice.com">http://www.marchantdice.com</a> )	Reino Unido	21,35 €	42,70 €
Guía cilíndrica de precisión 20 mm diámetro	579 mm	2	Marchant Dice LTD. ( <a href="http://www.marchantdice.com">http://www.marchantdice.com</a> )	Reino Unido	18,73 €	37,46 €
Guía cilíndrica de precisión 16 mm diámetro	427 mm	2	Marchant Dice LTD. ( <a href="http://www.marchantdice.com">http://www.marchantdice.com</a> )	Reino Unido	13,82 €	27,64 €
Soporte SHF20	--	8	eBay (Vendedor: may139188)	China	4,40 €	35,20 €
Soporte SHF16	--	4	eBay (Vendedor: smpart)	China	3,45 €	13,80 €



Motor paso a paso 57BYGH76-401B	--	3	eBay (Vendedor: b2cnc)	China	19,96 €	59,88 €
Acoplador husillo-motor	--	3	eBay (Vendedor: onlyforever702)	China	3,13 €	9,39 €
Pata regulable en altura	--	4	Ferretería local	España	1,06 €	4,24 €
Sensor SN04-N	--	6	eBay (Vendedor: Dragonmarts Company Limited)	China	3,96 €	23,76 €
Chapa galvanizada para fin de carrera	--	6	Ferretería local	España	0,50 €	3,00 €
Arandela caucho	--	12	Ferretería local	España	0,13 €	1,56 €
Tornillo S12 x 30 T50	30 mm	30	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	0,46 €	13,80 €
Tornillo cabeza T M8 x 20 con tuerca	20 mm	10	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjn ltd.co.uk">http://www.kjn ltd.co.uk</a> )	Reino Unido	0,48 €	4,80 €
Tornillo rosca-chapa Nº 7 (3,9 mm)	Variada	18	Ferretería local	España	0,02 €	0,36 €
Tornillo rosca-chapa Nº 10 (4,8 mm)	Variada	80	Ferretería local	España	0,03 €	2,40 €
Tornillo rosca-chapa Nº 12 (5,5 mm)	Variada	40	Ferretería local	España	0,04 €	1,60 €
Cable 4 hilos 1,5 mm <sup>2</sup>	12	1	Ferretería local	España	18,36 €	18,36 €

Cable 4 hilos 0,20 mm <sup>2</sup>	15	1	Ferretería local	España	5,43 €	5,43 €
Regleta de conexión 12 polos	--	1	Ferretería local	España	0,60 €	0,60 €
Ordenables	--	1	Ferretería local	España	7,63 €	7,63 €
Bridas de plástico (Pack 100)	--	1	Ferretería local	España	0,51 €	0,51 €
Controladora GeckoDrive G251X	--	3	GeckoDrive ( <a href="http://www.geckodrive.com">http://www.geckodrive.com</a> )	Estados Unidos	47,69 €	143,07 €
Tarjeta interfaz MB-02-V6	--	1	Homann Designs ( <a href="http://www.homanndesigns.com">http://www.homanndesigns.com</a> )	Australia	39,99 €	39,99 €
Fuente de alimentación 48V 7,3A (350W)	--	1	eBay (Vendedor: anna758595)	China	25,10 €	25,10 €
LM2576HV T-ADJ	--	1	eBay (Vendedor: Mad Jungle Ltd)	China	0,69 €	0,69 €
<b>TOTAL</b>						<b>1.016,87 €</b>

Figura 64 se muestra un resumen de los materiales con sus respectivos proveedores, detallando las cantidades necesarias y su coste aproximado.

Material	Longitud	Cantidad	Proveedor	País	Coste unitario (Sin impuestos)	Coste total (Sin impuestos)
Perfil aluminio 40x120 mm	670 mm	6	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnlimited.co.uk">http://www.kjnlimited.co.uk</a> )	Reino Unido	19,12 €	114,72 €
Perfil aluminio 40x120 mm	589 mm	1	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnlimited.co.uk">http://www.kjnlimited.co.uk</a> )	Reino Unido	16,81 €	16,81 €

Perfil aluminio 40x120 mm	650 mm	2	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnLtd.co.uk">http://www.kjnLtd.co.uk</a> )	Reino Unido	18,55 €	37,10 €
Perfil aluminio 40x120 mm	140 mm	3	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnLtd.co.uk">http://www.kjnLtd.co.uk</a> )	Reino Unido	3,99 €	11,97 €
Perfil aluminio 40x120 mm	150 mm	1	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnLtd.co.uk">http://www.kjnLtd.co.uk</a> )	Reino Unido	4,28 €	4,28 €
Husillo de bolas 1605 clase 7 (incluye mecanizado)	686 mm	1	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	49,42 €	49,42 €
Husillo de bolas 1605 clase 7 (incluye mecanizado)	605 mm	1	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	43,58 €	43,58 €
Husillo de bolas 1605 clase 7 (incluye mecanizado)	453 mm	1	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	32,64 €	32,64 €
Soporte BK12 + BF12 clase 7 para husillo 1605	--	3	eBay (Vendedor: linearmotionbearings2008)	China	39,58 €	118,74 €
Rodamiento lineal SC20UU	--	8	eBay (Vendedor: iwannebuy)	China	5,49 €	43,92 €
Rodamiento lineal SC16UU	--	4	eBay (Vendedor: iwannebuy)	China	5,18 €	20,72 €
Guía cilíndrica de precisión 20 mm diámetro	660 mm	2	Marchant Dice LTD. ( <a href="http://www.marchantdice.com">http://www.marchantdice.com</a> )	Reino Unido	21,35 €	42,70 €

Guía cilíndrica de precisión 20 mm diámetro	579 mm	2	Marchant Dice LTD. ( <a href="http://www.marchantdice.com">http://www.marchantdice.com</a> )	Reino Unido	18,73 €	37,46 €
Guía cilíndrica de precisión 16 mm diámetro	427 mm	2	Marchant Dice LTD. ( <a href="http://www.marchantdice.com">http://www.marchantdice.com</a> )	Reino Unido	13,82 €	27,64 €
Soporte SHF20	--	8	eBay (Vendedor: may139188)	China	4,40 €	35,20 €
Soporte SHF16	--	4	eBay (Vendedor: smpart)	China	3,45 €	13,80 €
Motor paso a paso 57BYGH76-401B	--	3	eBay (Vendedor: b2cnc)	China	19,96 €	59,88 €
Acoplador husillo-motor	--	3	eBay (Vendedor: onlyforever702)	China	3,13 €	9,39 €
Pata regulable en altura	--	4	Ferretería local	España	1,06 €	4,24 €
Sensor SN04-N	--	6	eBay (Vendedor: Dragonmarts Company Limited)	China	3,96 €	23,76 €
Chapa galvanizada para fin de carrera	--	6	Ferretería local	España	0,50 €	3,00 €
Arandela caucho	--	12	Ferretería local	España	0,13 €	1,56 €
Tornillo S12 x 30 T50	30 mm	30	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnlimited.co.uk">http://www.kjnlimited.co.uk</a> )	Reino Unido	0,46 €	13,80 €
Tornillo cabeza T M8 x 20 con tuerca	20 mm	10	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnlimited.co.uk">http://www.kjnlimited.co.uk</a> )	Reino Unido	0,48 €	4,80 €

Tornillo rosca-chapa Nº 7 (3,9 mm)	Variada	18	Ferretería local	España	0,02 €	0,36 €
Tornillo rosca-chapa Nº 10 (4,8 mm)	Variada	80	Ferretería local	España	0,03 €	2,40 €
Tornillo rosca-chapa Nº 12 (5,5 mm)	Variada	40	Ferretería local	España	0,04 €	1,60 €
Cable 4 hilos 1,5 mm <sup>2</sup>	12	1	Ferretería local	España	18,36 €	18,36 €
Cable 4 hilos 0,20 mm <sup>2</sup>	15	1	Ferretería local	España	5,43 €	5,43 €
Regleta de conexión 12 polos	--	1	Ferretería local	España	0,60 €	0,60 €
Ordenables	--	1	Ferretería local	España	7,63 €	7,63 €
Bridas de plástico (Pack 100)	--	1	Ferretería local	España	0,51 €	0,51 €
Controladora GeckoDrive G251X	--	3	GeckoDrive ( <a href="http://www.geckodrive.com">http://www.geckodrive.com</a> )	Estados Unidos	47,69 €	143,07 €
Tarjeta interfaz MB-02-V6	--	1	Homann Designs ( <a href="http://www.homanndesigns.com">http://www.homanndesigns.com</a> )	Australia	39,99 €	39,99 €
Fuente de alimentación 48V 7,3A (350W)	--	1	eBay (Vendedor: anna758595)	China	25,10 €	25,10 €
LM2576HV T-ADJ	--	1	eBay (Vendedor: Mad Jungle Ltd)	China	0,69 €	0,69 €
<b>TOTAL</b>						<b>1.016,87 €</b>

Figura 64: Resumen de materiales

### 5.1.2. Herramientas

Para la construcción de esta máquina requeriremos de:

- Taladro de columna: Utilizado para realizar todos los orificios en los perfiles de aluminio. Se recomienda una potencia de más de 500W y un recorrido del portabrocas mayor a los 6 cm.
- Brocas para metal: Usados para la realización de los orificios que servirán de fijación para los componentes. Los diámetros usados son:
  - 3 mm
  - 4 mm
  - 5 mm
  - 8,5 mm
  - 10 mm
- Coronas para metal: Sirven para realizar orificios de gran diámetro, por lo que su papel en este proyecto es principalmente el de realizar los orificios para los husillos. Los diámetros usados son:
  - 19 mm
  - 29 mm
- Inclinómetro de precisión: Nos permitirá colocar correctamente todos los componentes de la máquina, especialmente guías cilíndricas y husillos. Se recomienda una resolución de 0.01°.
- Calibre digital: Nos permitirá realizar mediciones de distancias con mucha precisión. Se recomienda un calibre con una precisión mínima de 0,1 mm.
- Llaves Allen: Usadas en los tornillos de apretado de diferentes componentes. Los diámetros usados son:
  - 2 mm
  - 3 mm
  - 4 mm
- Destornilladores: El tipo y diámetro de los mismos vendrá determinado por la cabeza de la tornillería escogida.
- Llave Torx T50: Usado en la tornillería responsable de la unión de los diferentes perfiles que forman la estructura.
- Llave hexagonal hembra de 13 mm: Nos permitirá realizar el apretado de las tuercas que unen el eje Z con el eje X.

- Soldador de lápiz: Necesario para realizar las soldaduras de prolongación del cableado de los finales de carrera.
- Macho de roscar para tornillo de 10 mm de diámetro: Usado en la creación de la rosca que permitirá la fijación de las patas que sustentarán todo el peso de la máquina.

En la Figura 65 se resumen todas las herramientas, así como el proveedor y coste aproximado de las mismas.

Herramienta	Cantidad	Proveedor	País	Coste unitario (Sin impuestos)	Coste total (Sin impuestos)
Taladro de columna 500W	1	Ferretería local	España	84,75 €	84,75 €
Juego brocas metal	1	Ferretería local	España	10,17 €	10,17 €
Juego coronas metal	1	Ferretería local	España	19,49 €	19,49 €
Inclinómetro de precisión (0.01°)	1	eBay (Vendedor: mib_instruments)	China	74,86 €	74,86 €
Calibre de precisión (0.01 mm)	1	Ferretería local	España	25,42 €	25,42 €
Juego llaves Allen	1	Ferretería local	España	5,08 €	5,08 €
Destornillador con cabezas intercambiables	1	Ferretería local	España	12,29 €	12,29 €
Llave Torx T50	1	KJN Aluminium Profile ( <a href="http://www.kjnlt.d.co.uk">http://www.kjnlt.d.co.uk</a> )	Reino Unido	7,87 €	7,87 €
Llave hexagonal hembra 13 mm	1	Ferretería local	España	2,12 €	2,12 €
Soldador lápiz 30W	1	Ferretería local	España	9,32 €	9,32 €
Macho de roscar 10 mm diámetro	1	Ferretería local	España	9,49 €	9,49 €
<b>TOTAL</b>					<b>260,86 €</b>

Figura 65: Resumen de herramientas

### 5.1.3. Proceso de fabricación

A continuación se detallarán todos los pasos a seguir para fabricar la máquina de control numérico a partir de los materiales y herramientas anteriormente comentados. Además se proporcionan diferentes consejos para evitar cometer errores durante todo el proceso.

El primer eje a fabricar será el eje Z (Figura 66), encargado de la regulación de la altura de la herramienta. El resultado de la fabricación de este eje debe ser el siguiente:

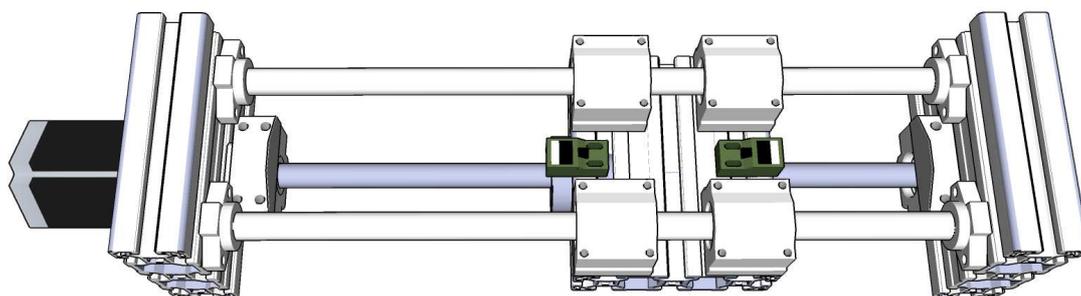


Figura 66: Eje Z

La estructura de este eje se encuentra formada por 3 perfiles de 140 mm de longitud. Este eje cuenta además con los siguientes componentes:

- 4 bloques SC16UU.
- 2 guías cilíndricas de 16 mm de diámetro de 427 mm de longitud.
- Husillo de bolas 1605 de 453 mm de longitud.
- Bloques BK12 y BF12.
- 4 soportes SHF16.
- 2 sensores SN04-N
- 2 láminas metálicas para final de carrera
- Motor paso a paso 57BYGH76-401B.
- 4 Arandelas de caucho
- 1 acoplador motor-husillo
- 40 tornillos Nº 10 (16 - SC16UU, 4 - husillo, 8 - BK12+BF12, 8 - SHF16, 4 Motor PaP)
- 6 tornillos Nº 7 (4 - SN04-N, 2 regleta conexión)

Para la realización de los orificios con el taladro de columna se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Colocación de componente en localización exacta. Es importante que sea exactamente ese componente y no otro del mismo tipo, ya que los orificios de sujeción de los mismos no son siempre idénticos.
- Con tornillo de diámetro similar a los orificios de fijación del componente, realizar el marcado del aluminio mediante el golpeado del tornillo para cada uno de los orificios.

- Marcado con rotulador fino de una cruz sobre la localización exacta de la marca. El diámetro de la cruz debe ser superior al de la broca a usar.
- Taladrado superficial sobre la cruz. Retirada de la broca y comprobación de la localización del taladrado realizado con respecto a la cruz.
- Corrección del error cometido mediante movimiento de la pieza. Repetir paso anterior en caso de existencia de error.
- Finalizar taladrado.

Para el caso de orificios cuya profundidad supera al recorrido de nuestro taladro de columna (paso de husillo por perfil) se recomienda realizar un taladrado en cada extremo del orificio a realizar. Puede suceder que el recorrido de nuestro taladro sea inferior a la mitad de la longitud del orificio a realizar. En este caso, una vez llegado al tope de profundidad, se elevará manualmente la plataforma en la que se apoya la pieza, incrementando así la profundidad del orificio.

Una vez conocida la metodología de taladrado se procede al taladrado del perfil central que permitirá el paso del husillo. Dado que el husillo tiene un diámetro de 16 mm, la corona a usar en uno de los extremos será la de 19 mm. En el extremo contrario se realizará un orificio con la corona de 29 mm, orificio que dará cabida a la tuerca del husillo. Este orificio se debe realizar en el centro de uno de los lados de 140 mm del perfil, es decir, a 70 mm y 20 mm de distancia de los extremos. Una vez realizado el orificio, colocaremos el husillo y realizaremos los 4 ó 6 taladrados de sujeción del mismo. Se recomienda que la disposición del husillo respecto al perfil sea la que se indica en la Figura 67.

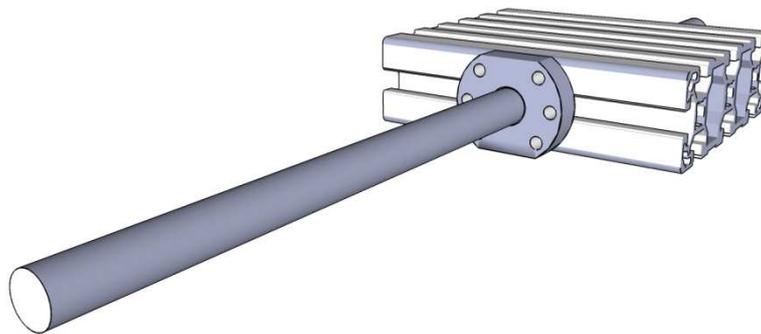


Figura 67: Disposición entre perfil y husillo

Realizados los orificios para el husillo, procedemos a la instalación de los 4 bloques SC16UU y los 2 finales de carrera. La disposición de estos elementos se muestra en la Figura 68.

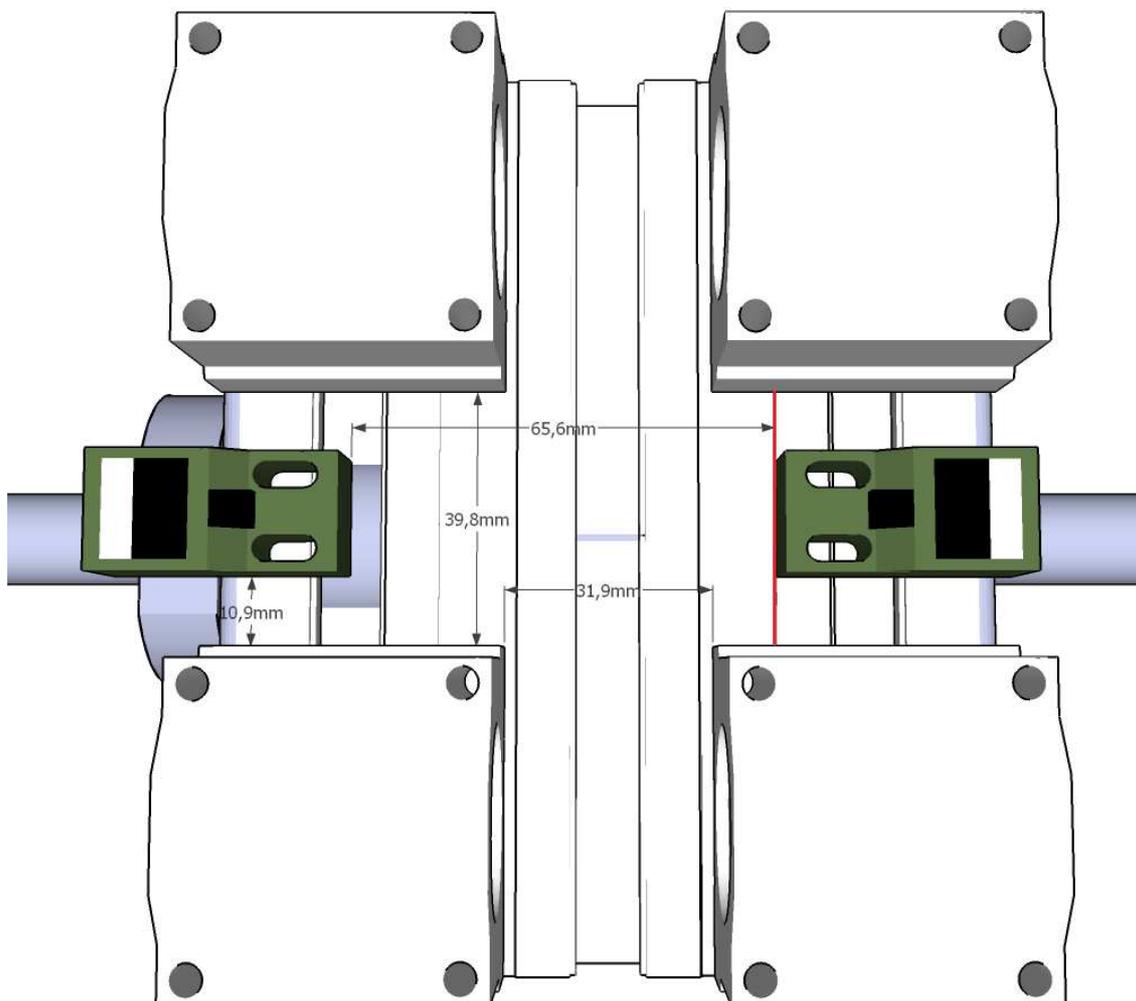


Figura 68: Disposición bloques SC16UU y sensores SN04-N en el eje Z

Los 4 bloques SC16UU se posicionarán en cada una de las esquinas del perfil. Los finales de carrera se posicionarán conforme las acotaciones de la figura, teniendo en cuenta la coincidencia del inicio del sensor derecho con uno de los pliegues del perfil (línea roja). Las brocas a usar son de 4 mm para los bloques SC16UU y de 3 mm para los sensores.

Debido a que cada guía cilíndrica cuenta con 2 bloques SC16UU, se recomienda seguir los siguientes pasos para su instalación:

- Taladrado y atornillado de uno de los bloques de la guía. Este bloque se encontrará alineado con el propio perfil.
- Hacer pasar la guía por el bloque atornillado.
- Hacer pasar el segundo bloque por la guía.
- Realizar el marcado de los orificios para el segundo bloque.

De esta forma nos aseguramos de que los bloques de una guía se encuentran totalmente alineados con la misma.

El siguiente paso consiste en el nivelado de las guías cilíndricas, por lo que será necesario el atornillado suave al perfil de los mismos, permitiendo un ligero movimiento de los bloques. Una vez detectada la posición correcta de estos bloques, realizamos un atornillado fuerte de los mismos. Debemos realizar las siguientes nivelaciones:

- El husillo debe ser paralelo a las guías.
- Las guías deben ser paralelas entre sí.

Finalizada la nivelación procedemos a instalar los componentes del perfil responsable de fijar al motor. La disposición de los elementos para uno de los lados de este perfil es la que se indica en la Figura 69.

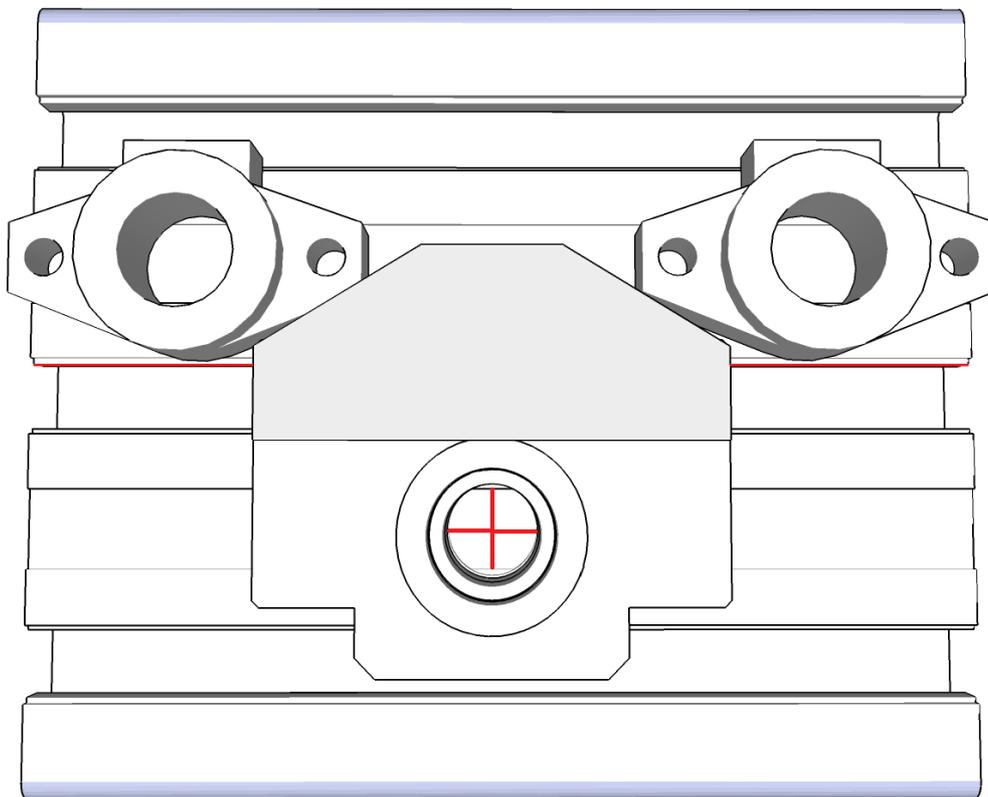


Figura 69: Perfil responsable de fijar el motor en el eje Z

El procedimiento a seguir para la fabricación de esta pieza consta de los siguientes pasos:

- Realización de orificio con corona de 29 mm en ambos lados del perfil. La localización de este orificio se encuentra en el centro del lado de 140 mm y a 40 mm de uno de los extremos del lado de 120 mm.
- Alineación del inicio del bloque BK12 con el pliegue de aluminio marcado con rojo.
- Realización de taladrados (4 mm) para fijación de bloque.
- Fijación de bloque BK12 al husillo ya atornillado al perfil central construido.
- Atornillado de bloque BK12.
- Colocación de soportes SHF16 en los extremos de las guías lineales.
- Marcado en el perfil de los orificios de instalación de los soportes SHF16.
- Desatornillado de bloque BK12 y realización de orificios (4 mm) para soportes SHF16.
- Atornillado de todos los componentes e instalación de lámina metálica sobre bloque BK12 como se indica en la figura.

Con este procedimiento mantendremos el paralelismo anteriormente conseguido por nivelación, evitando la flexión de las guías por desviación en la posición de los componentes.

El procedimiento a seguir para el lado opuesto de este perfil es:

- Instalar acoplador en eje del husillo.
- Acople de motor al acoplador instalado en el husillo.
- Realización de marcas para orificios de sujeción del motor.
- Taladrado con broca de 4 mm de las marcas.
- Instalación del motor con arandelas de caucho y apretado de los tornillos de sujeción del acoplador. Para alcanzar estos tornillos recurriremos a una de las cavidades del perfil de aluminio que nos da el acceso a los mismos.

Para finalizar este perfil únicamente deberemos realizar 2 taladrados con la broca de 3 mm para la colocación de la regleta de conexión (4 polos, uno por cada cable del motor). La posición de esta regleta en el perfil es indiferente siempre que no se interponga entre los elementos en movimiento.

El último perfil de este eje mantiene un proceso de fabricación muy similar al anterior, con la salvedad de que este perfil no tiene motor alguno, y por tanto requiere de menos manipulaciones. La distribución de sus elementos es la indicada en la Figura 70.

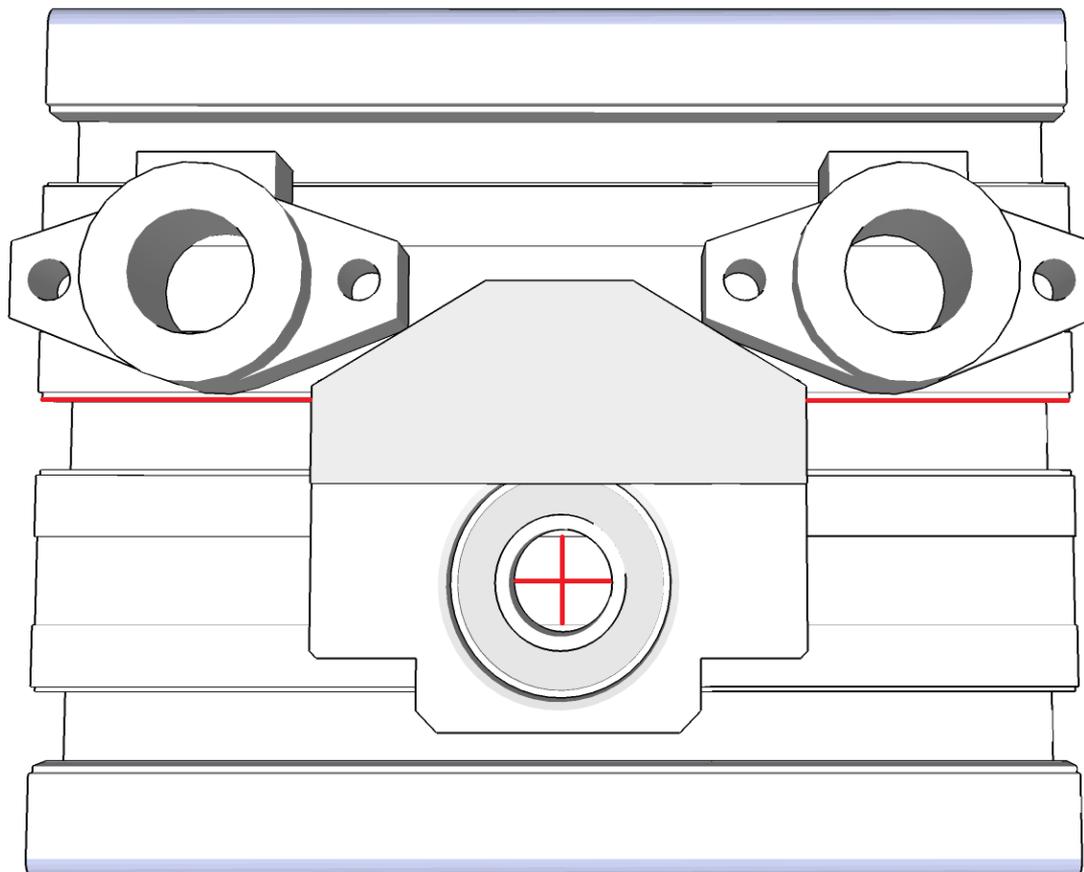


Figura 70: Perfil extremo sin motor en eje Z

- Alineación del inicio del bloque BF12 con el pliegue de aluminio marcado con rojo. El centro de la principal cavidad de este bloque deberá corresponderse con la mitad exacta del lado de 140 mm.
- Realización de taladrados (4 mm) para fijación de bloque.
- Fijación de bloque BF12 al husillo ya atornillado al perfil central construido.
- Atornillado de bloque BF12.
- Colocación de soportes SHF16 en los extremos de las guías lineales.
- Marcado en el perfil de los orificios de instalación de los soportes SHF16.
- Desatornillado de bloque BF12 y realización de orificios (4 mm) para soportes SHF16.
- Atornillado de todos los componentes e instalación de lámina metálica sobre bloque BF12 como se indica en la figura.

Con este procedimiento ya habremos finalizado la fabricación del eje Z de la máquina. El siguiente paso consiste en fabricar el eje X y acoplar el eje Z al mismo. El resultado de la fabricación de este eje con el eje Z acoplado es el de la Figura 71.

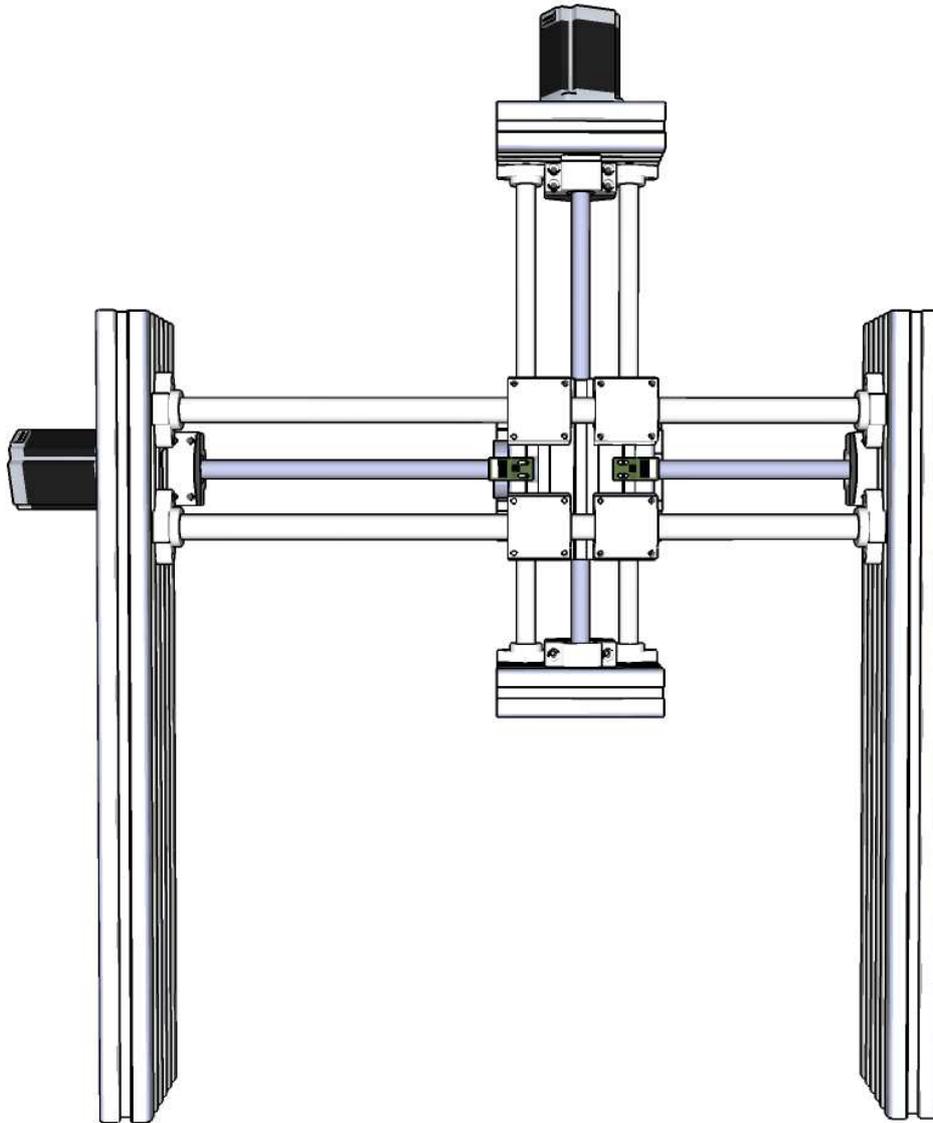


Figura 71: Eje X

La estructura de este eje se encuentra formada por 2 perfiles de 650 mm y uno de 150 mm. Este eje cuenta además con los siguientes componentes:

- 4 bloques SC20UU.
- 2 guías cilíndricas de 20 mm de diámetro de 579 mm de longitud.
- Husillo de bolas 1605 de 605 mm de longitud.
- Bloques BK12 y BF12.
- 4 soportes SHF20.
- 2 sensores SN04-N
- 2 láminas metálicas para final de carrera
- Motor paso a paso 57BYGH76-401B.
- 4 Arandelas de caucho
- 1 acoplador motor-husillo
- 6 tornillos Nº 7 (4 - SN04-N, 2 regleta conexión)
- 32 tornillos Nº 10 (16 - SC20UU, 4 - husillo, 8 - BK12+BF12, 4 Motor PaP)
- 8 tornillos Nº 12 (8 - SHF20)
- 4 Tornillos cabeza T M8 x 20 con tuerca

Comenzaremos por el perfil de 150 mm, responsable de fijar los bloques SC20UU, la tuerca del husillo y los finales de carrera.

La realización de taladrado para el paso del husillo al igual que se hizo con el eje Z, con la diferencia de que la longitud de este perfil es de 150 mm, y por lo tanto su centro se encontrará a 750 mm de los extremos.

Tras este taladrado procedemos a realizar los 4 orificios que permitirán el acople del eje Z con el eje X. La localización de los taladrados realizados con corona de 19 mm es la indicada en la Figura 72.

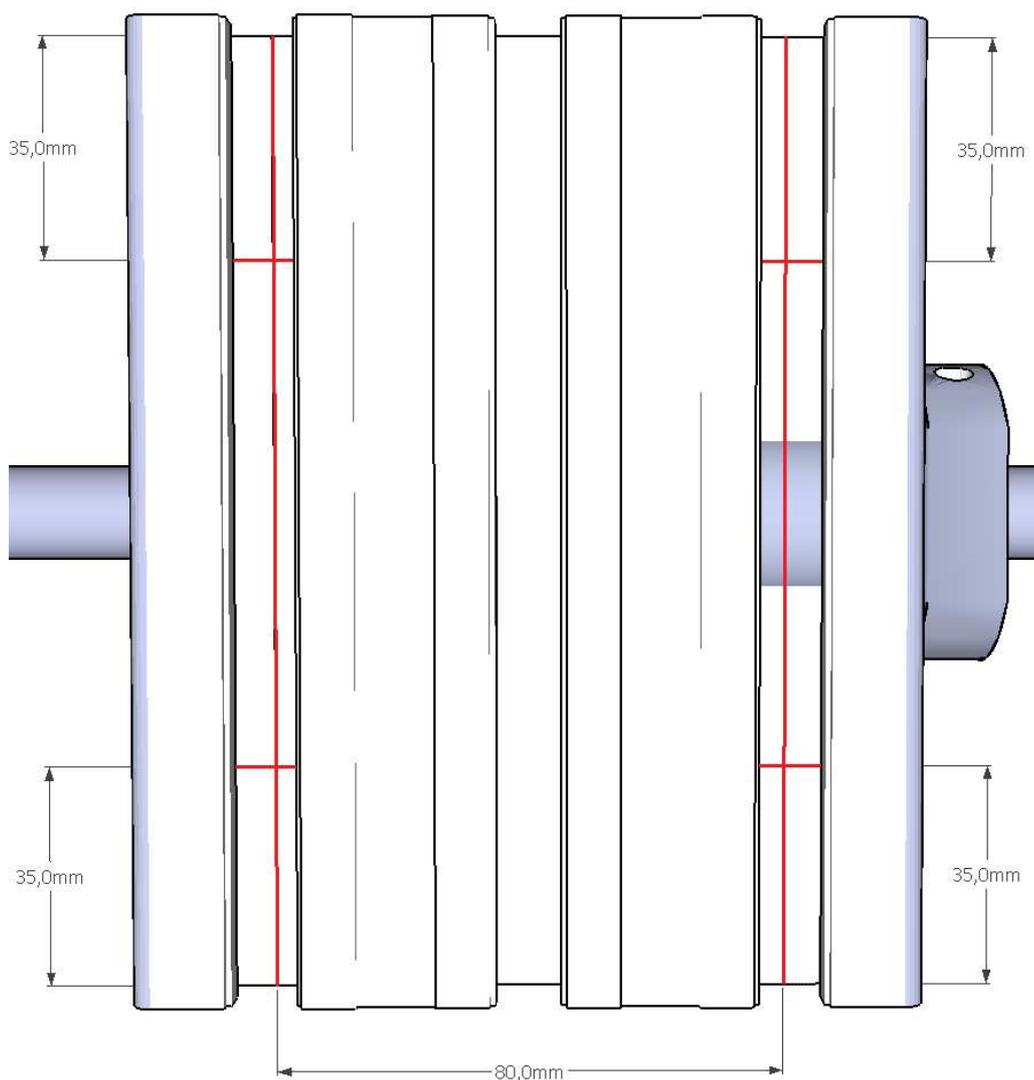


Figura 72: Esquema taladrado para unió de eje Z y X

Debemos tener la precaución de realizar los taladrados con una profundidad de 34 mm, ya que será en estos orificios donde alberguemos a las tuercas. Si superásemos esta profundidad, es decir, llegásemos al otro extremo del perfil, las tuercas podrían traspasar el perfil y por tanto no se podría realizar la sujeción con el eje Z.

El siguiente paso consiste en la instalación de los 4 bloques SC20UU y los 2 finales de carrera. La disposición de estos elementos es la indicada en la Figura 73.

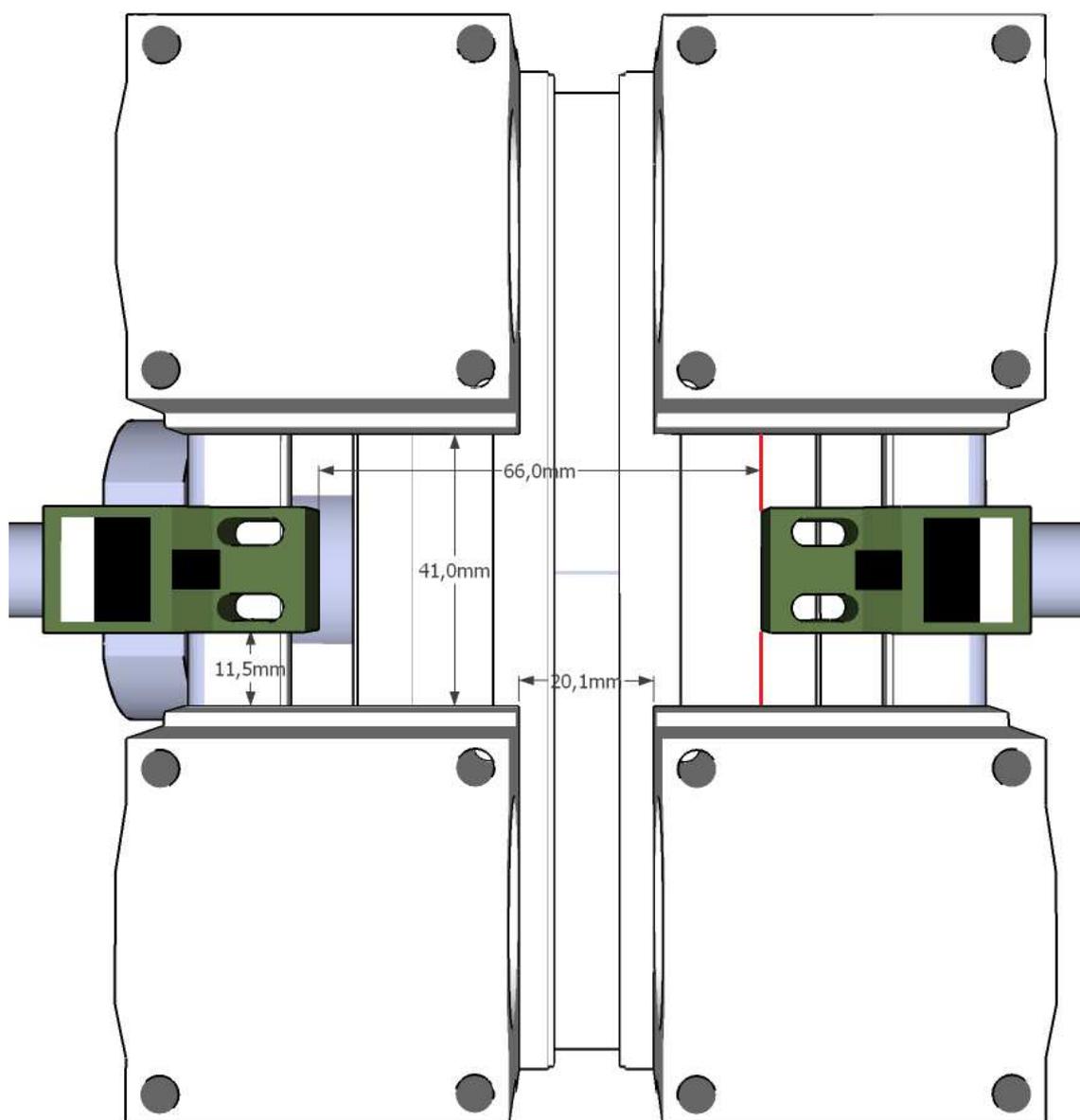


Figura 73: Disposición bloques SC20UU y sensores SN04-N en el eje X

La metodología a seguir es idéntica a la pieza central del eje Z, usando igualmente una broca de 4 mm para los bloques SC20UU y una de 3 mm para los finales de carrera. Es necesario tener en cuenta el hecho de que los bloques SC20UU cubren los orificios realizados para la unión del eje Z con el eje X, por lo que se deberán unir los dos perfiles antes del nivelado y atornillado definitivo de los rodamientos lineales.

Para la unión de estos perfiles se instalarán 4 tornillos con cabeza en T en el eje Z de forma que estos puedan pasar por los orificios realizados en el perfil del eje X. Tras esto se enroscarán las tuercas en los tornillos, fijando ambos perfiles de la como indica la Figura 74.

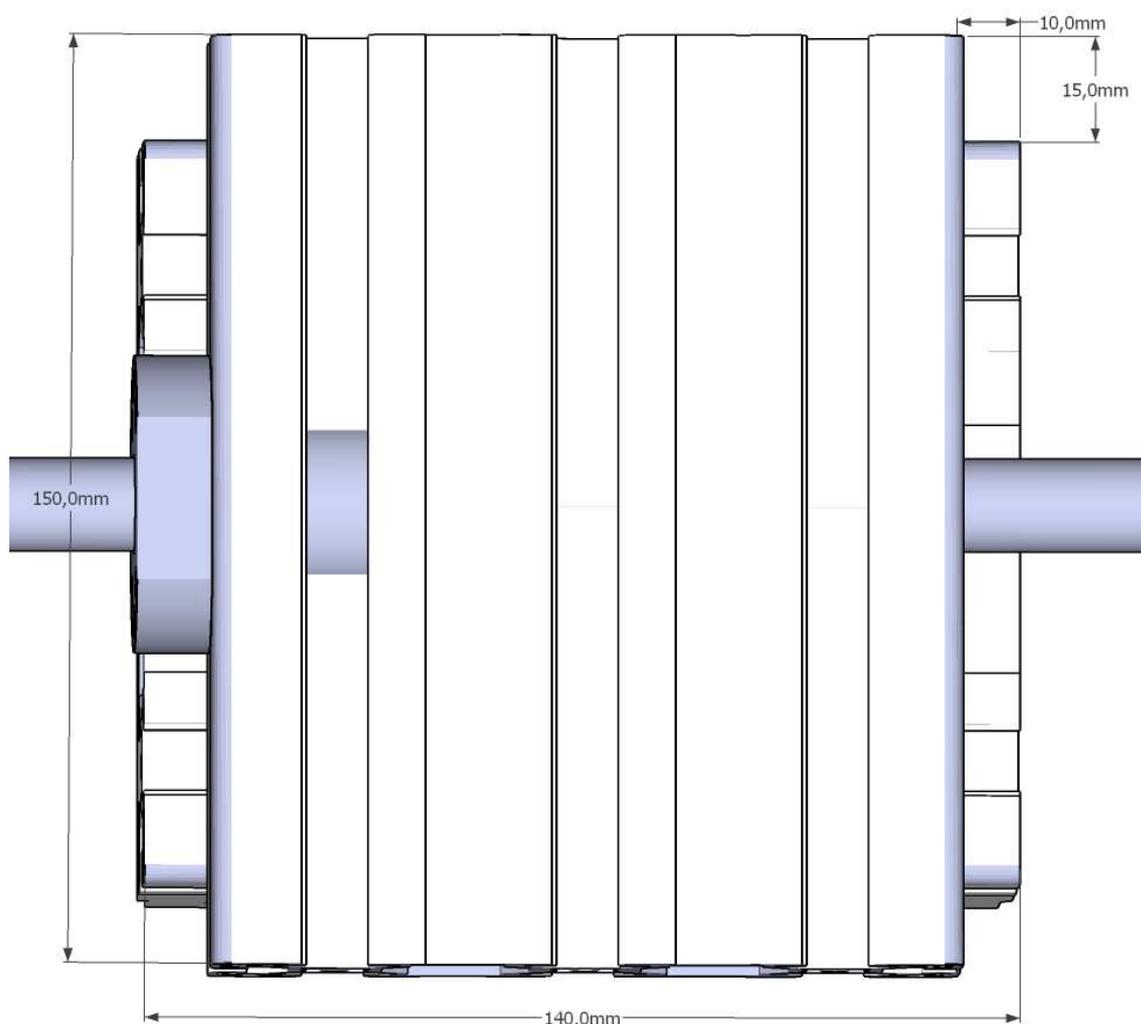


Figura 74: Unión de eje Z con eje X

Observamos en la figura la perpendicularidad entre sí de los perfiles, por lo que deberemos asegurarnos de la misma con el inclinómetro usado en la nivelación de las guías. Completada la fijación, se procederá al atornillado y nivelación de los bloques SC20UU con el mismo procedimiento usado en el eje Z, sin olvidar la instalación de los finales de carrera.

Finalizado el perfil central procedemos a instalar los componentes del perfil responsable de fijar al motor (perfil de 650 mm de longitud). La disposición de los elementos para uno de los lados de este perfil es la indicada en la Figura 75.

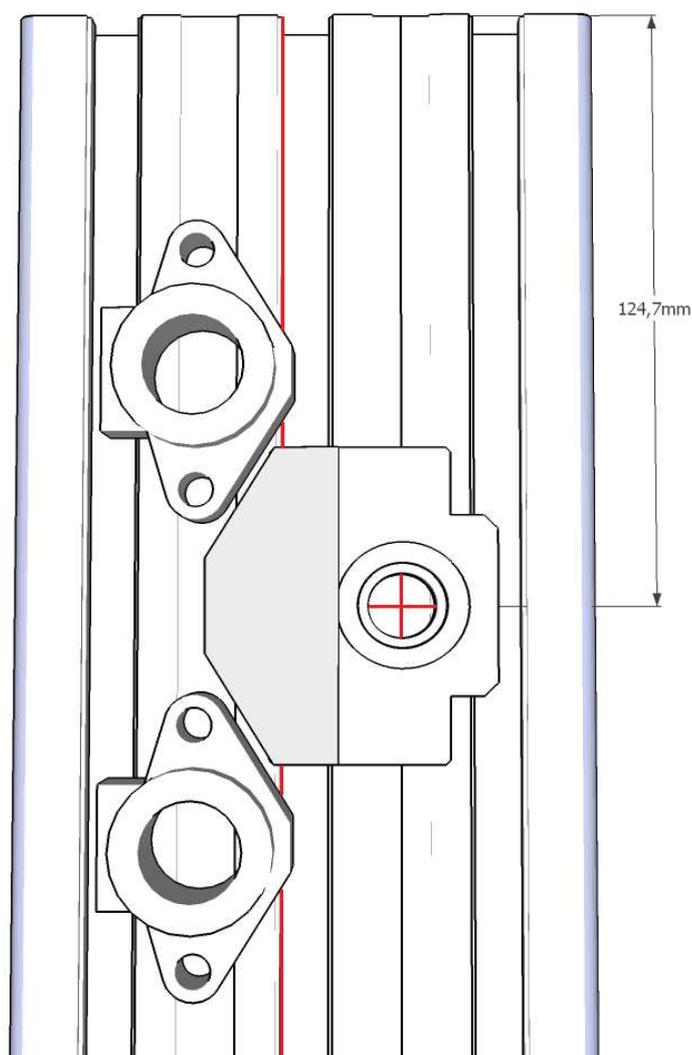
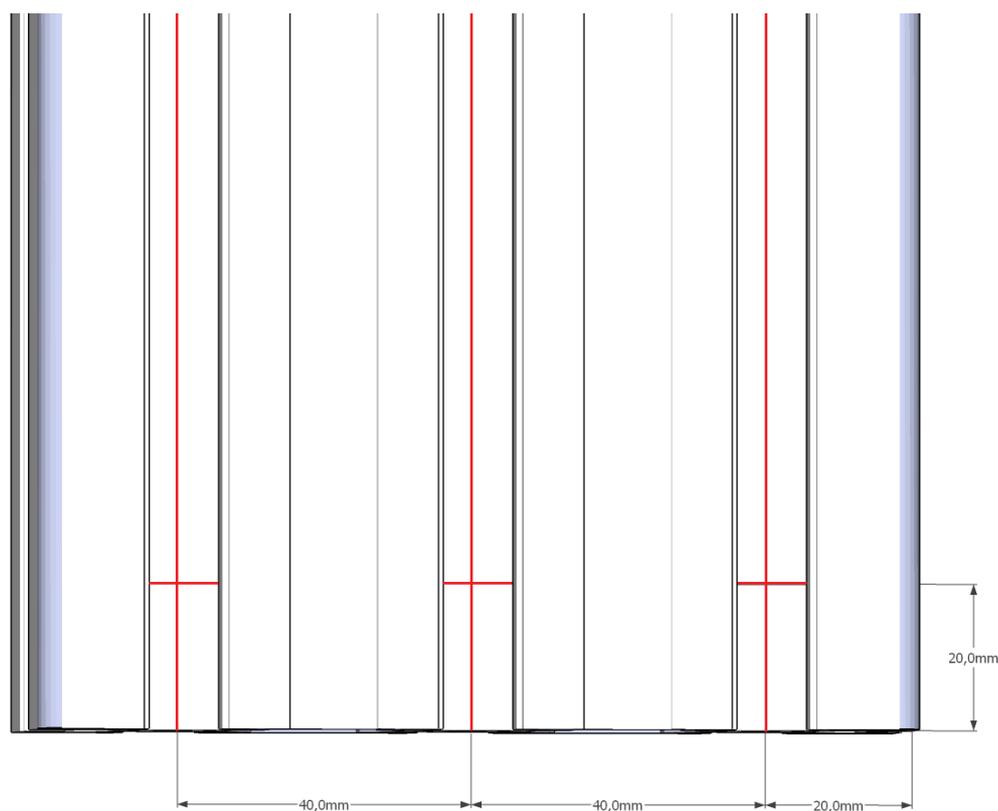


Figura 75: Perfil responsable de fijar el motor en el eje X

El procedimiento de fabricación es idéntico al perfil del eje Z con el motor, con la salvedad de la distancia de 124,7 mm respecto al extremo del perfil. Es necesario hacer especial hincapié en la correcta alineación de los soportes SHF20, ya que el atraso o adelanto de uno de los mismos hará inclinarse al eje Z. Siempre podremos comprobar con el inclinómetro la correcta posición de estos soportes. Antes de proceder a la fijación de los componentes se realizarán en el otro extremo del perfil los taladrados indicados en la Figura 76. La broca a usar para estos taladrados será la de 10 mm.



**Figura 76: Taladrados para unión de ejes X e Y.**

Estos taladrados permitirán el paso de la llave T50 para el apriete de los tornillos S12 x 30 que fijarán este perfil al perfil horizontal movido por el eje Y. No debemos fijar aún las guías o el husillo ya que en la fabricación del eje Y se necesitará taladrar este perfil.

El siguiente perfil a tratar será el responsable de la sujeción del otro extremo del husillo y de las guías, también de 650 mm de longitud. La distribución de los elementos es la idéntica a la del perfil con el motor. Al igual que en el perfil anterior, el procedimiento a seguir será el mismo que el realizado en el eje Z (teniendo en cuenta, otra vez, la nueva distancia al extremo del perfil). También se realizarán los orificios en el extremo inferior para el paso de la llave T50 y se dejarán sin fijar las guías y el husillo.

El siguiente y último paso será la fabricación del eje Y. El resultado de la fabricación de este eje con el eje Z e Y acoplados da lugar a la totalidad de la máquina (Figura 44).

La estructura de este eje se encuentra formada por 6 perfiles de 670 mm y 1 de 589 mm. Este eje cuenta además con los siguientes componentes:

- 4 bloques SC20UU.
- 2 guías cilíndricas de 20 mm de diámetro de 660 mm de longitud.
- Husillo de bolas 1605 de 686 mm de longitud.
- Bloques BK12 y BF12.
- 4 soportes SHF20.
- 2 sensores SN04-N
- 2 láminas metálicas para final de carrera
- Motor paso a paso 57BYGH76-401B.
- 4 Arandelas de caucho
- 1 acoplador motor-husillo
- 6 tornillos Nº 7 (4 - SN04-N, 2 regleta conexión)
- 32 tornillos Nº 10 (16 - SC20UU, 4 - husillo, 8 - BK12+BF12, 4 Motor PaP)
- 8 tornillos Nº 12 (8 - SHF20)
- 30 tornillos S12x30 T50
- 4 patas regulables en altura

Comenzaremos por la fabricación del perfil de 589 mm, perfil en el que se fijará la tuerca del husillo pero NO los bloques con rodamientos lineales como sucedía en los anteriores ejes. El procedimiento para la fijación de la tuerca es el mismo que en el resto de ejes, teniendo en cuenta que la nueva distancia al extremo del perfil es la mitad de la longitud de la misma, es decir, 294.5 mm. Los finales de carrera para este eje se fijarán igual que en el resto de ejes.

El próximo paso será la realización de los orificios para el montaje de los bloques SC20UU. Estos bloques se montarán en la parte inferior de los perfiles de 650 mm como indica la Figura 77.

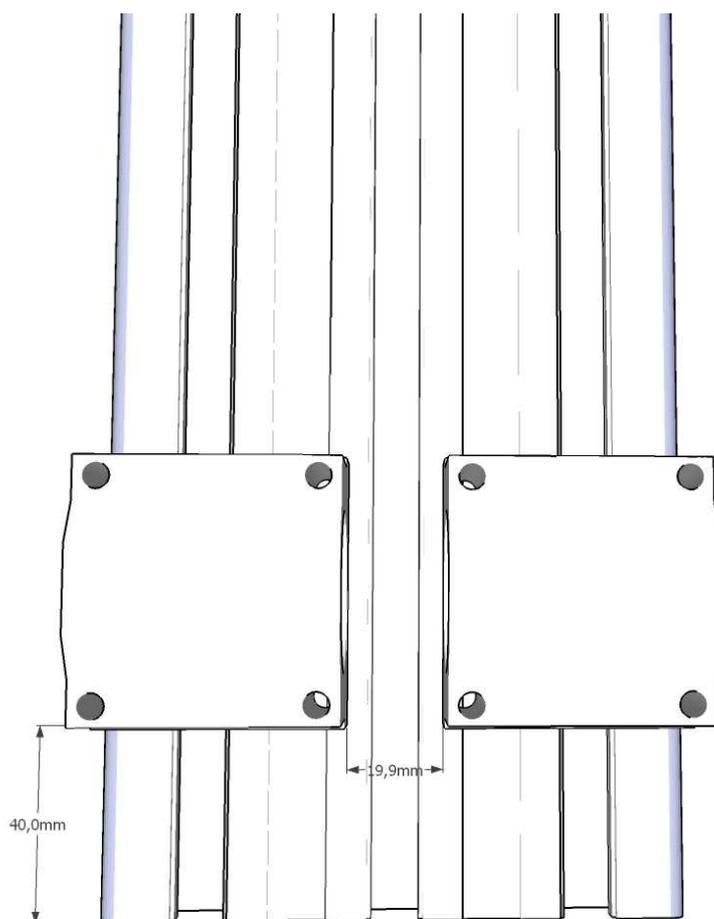


Figura 77: Posicionamiento de bloques SC20UU en el eje Y

La metodología a seguir es la misma que en el resto de ejes, con la salvedad de que no tendremos el husillo acoplado para la nivelación de los componentes. Es por ello que deberemos fijar el perfil de 589 mm a los perfiles de 650 mm con 6 tornillos S12x30 mediante los orificios realizados anteriormente para el paso de la llave T50. También instalaremos los componentes del eje X que no pudieron ser instalados en su momento. Una vez fijados los perfiles podremos realizar la nivelación mediante el procedimiento habitual.

Finalizado el elemento móvil del eje procedemos con la fabricación de los perfiles que soportarán a las guías y el husillo. El primero será el responsable de fijar al motor (perfil de 670 mm de longitud). La disposición de los elementos para uno de los lados de este perfil es la indicada en la Figura 78.

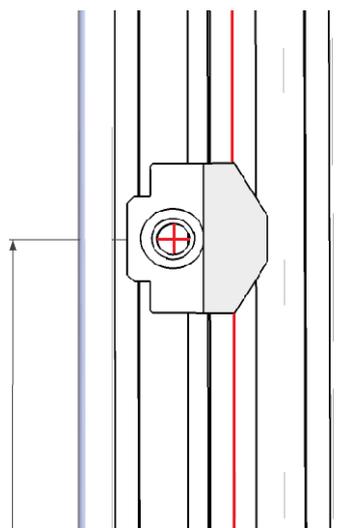


Figura 78: Perfil responsable de fijar el motor en el eje Y

Se procederá como con el resto de perfiles con motor y se tendrá en cuenta la distancia al extremo del perfil. Es necesario volver a hacer hincapié en la correcta alineación de los soportes SHF20, ya que el ascenso o descenso de uno de los mismos hará inclinarse al eje X, y por tanto también al resto de ejes. Antes de proceder a la fijación de los componentes se realizarán en el perfil los taladrados indicados en la Figura 79. La broca a usar para estos taladrados será la de 10 mm.

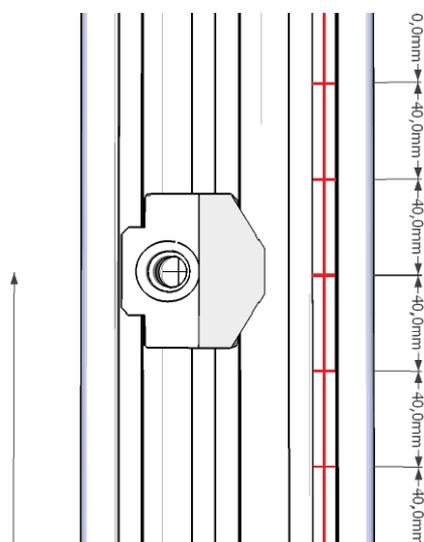


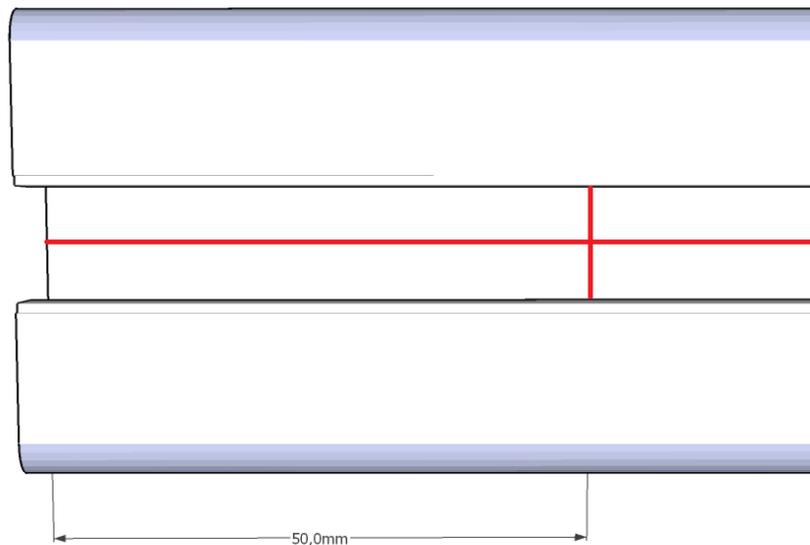
Figura 79: Taladrados para formación de mesa de trabajo

Estos taladrados permitirán el paso de la llave T50 para el apriete de los tornillos S12 x 30. La función de estos tornillos será fijar el actual perfil al resto de perfiles que conforman la mesa de trabajo de la máquina. No debemos fijar aún las guías o el husillo ya que estos deberán ser instalados al mismo tiempo que la mesa de trabajo.

El siguiente perfil a tratar será el responsable de la sujeción del otro extremo del husillo y de las guías, también de 670 mm de longitud. La distribución de los elementos es la idéntica a la

del perfil con el motor, por lo que el procedimiento a seguir para su fabricación también es el mismo. También se realizarán los orificios para la mesa de trabajo en este perfil.

El siguiente paso consiste en la realización de los orificios roscados para las patas regulables. Para ello realizaremos el taladrado indicado en la Figura 80 en los extremos inferiores de los dos últimos perfiles manipulados con una broca de 8,5 mm. Una vez realizados los orificios procedemos a roscarlos mediante el macho de roscar.



**Figura 80: Posición de orificio para instalación de pata**

Por último únicamente tendremos que atornillar todos los componentes, con especial precaución de no mantener en ningún momento todo el peso del eje X sobre el husillo, ya que éste se doblaría y quedaría inservible. Se recomienda usar algún tipo de soporte para elevar el eje X y hacer todo el montaje del eje Y en dicha posición.

En

la

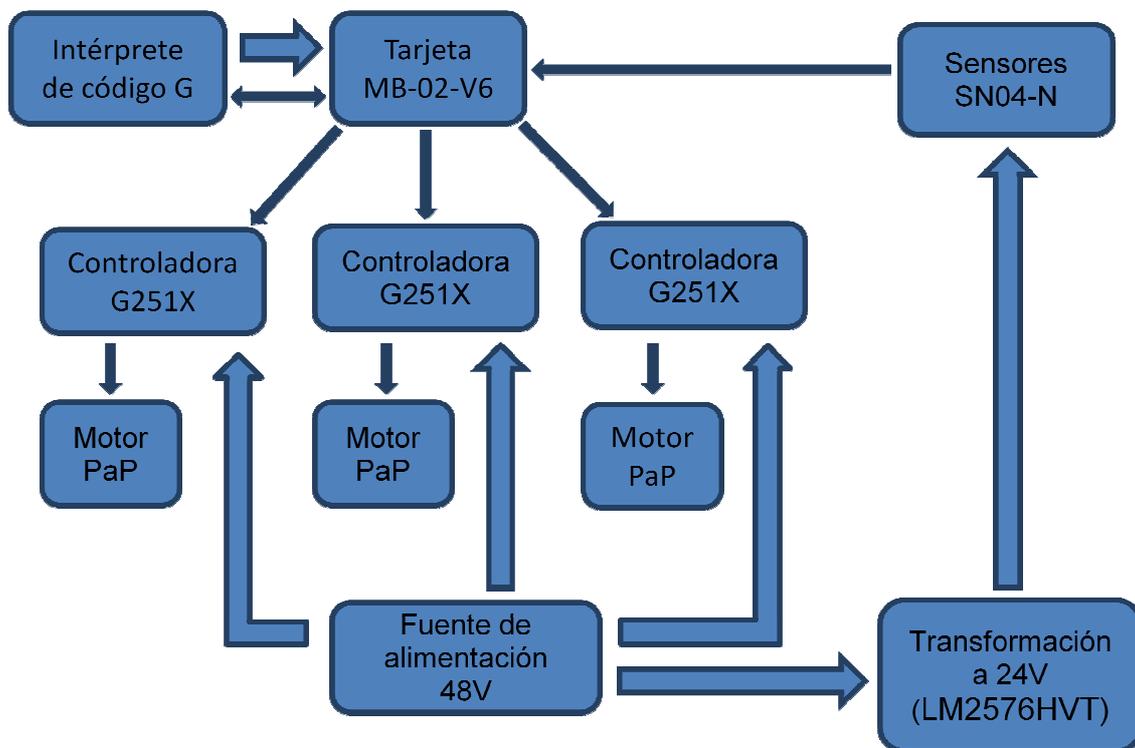


Figura 81 se muestran las conexiones entre los distintos elementos del sistema. Se ha recurrido a flechas delgadas en el caso de transmisión de señales y a flechas gruesas en el caso de transmisión de energía. El sentido de la transmisión será el indicado por la flecha.

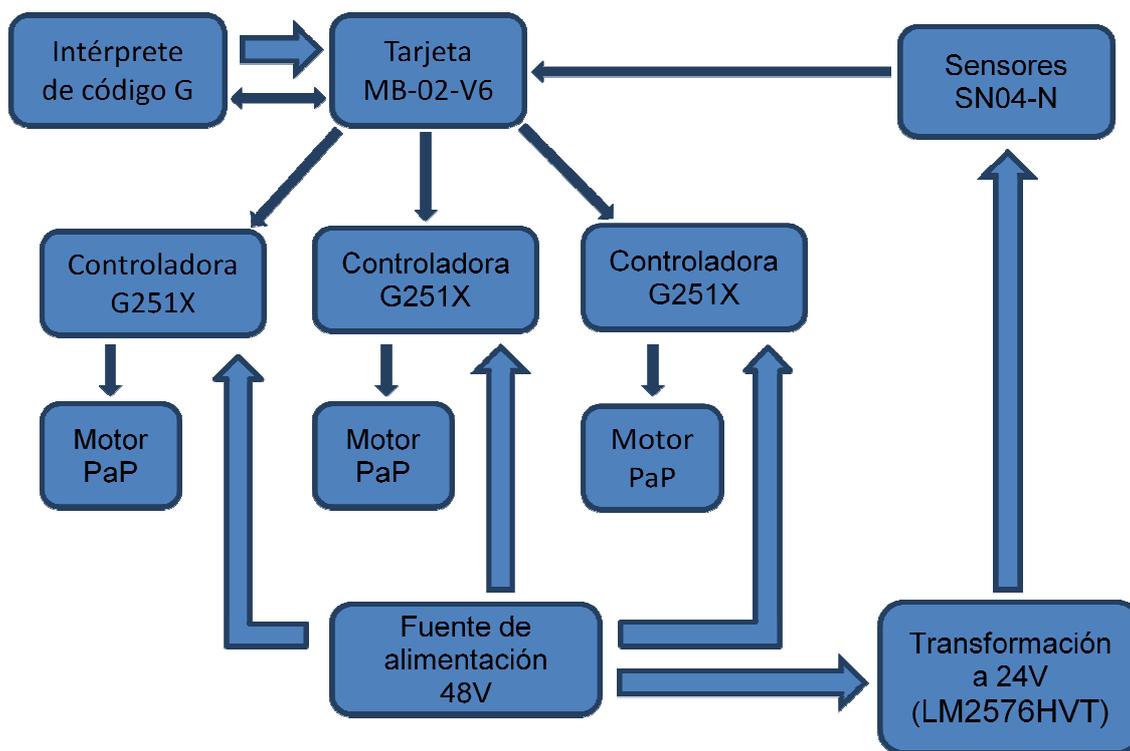


Figura 81: Diagrama de conexión entre componentes

Para el conexionado en detalle de estos componentes es necesario recurrir al manual de la tarjeta MB-02-V6 ([http://www.homanndesigns.com/pdfs/MB-02V6\\_User\\_Manual\\_R1.pdf](http://www.homanndesigns.com/pdfs/MB-02V6_User_Manual_R1.pdf)) y al de la controladora G251X ([http://www.geckodrive.com/images/fck\\_uploads/G251%20REV-9%20MANUAL%20FORMATTED.pdf](http://www.geckodrive.com/images/fck_uploads/G251%20REV-9%20MANUAL%20FORMATTED.pdf)).

## 5.2. Control manual

En lo que respecta al control manual, en primer lugar se detallará el software de terceros usado. Tras esto, se procederá a dar una visión general del diseño realizado. Por último se describirá en detalle el funcionamiento de cada una de las clases que conforman la aplicación.

### 5.2.1. Software usado

#### 5.2.1.1. Qt

Para el presente proyecto se ha optado por el lenguaje de programación C++ y el uso de Qt 4.7, una librería multiplataforma ampliamente usada para desarrollo aplicaciones.

Utiliza C++ de forma nativa, aunque puede ser utilizado en otros lenguajes de programación a través de *bindings*.

Funciona en todas las principales plataformas, y tiene un amplio soporte. El API de la librería cuenta con métodos para acceder a bases de datos mediante SQL, así como uso de XML, gestión de hilos, soporte de red y un largo etcétera. Qt es software libre y de código abierto.

En el presente proyecto se ha recurrido tanto a la parte gráfica de la librería Qt (diseño de la interfaz gráfica) como a otras clases de la librería, como son:

- QString: Implementación propia de Qt del tipo string
- QList: Lista enlazada de objetos
- QQueue: Cola de objetos
- QTcpSocket: Socket TCP
- QTimer: Temporizador
- QPoint: Punto con coordenadas bidimensionales
- QFile: Gestión de ficheros
- QPixmap: Representación de imágenes (puede ser usado como dispositivo de dibujo)

El hecho de usar únicamente esta librería permite que nuestra aplicación sea fácilmente portable a todas las plataformas compatibles con Qt.

#### **5.2.1.2. EMC2 y emcrsh**

PantoMax se sustenta en el intérprete de código G EMC2 (Enhanced Machine Controller) versión 2.4.6 para el sistema operativo GNU/Linux (concretamente Ubuntu 10.04 "Lucid Lynx" LTS). EMC2 es software libre bajo licencia *GNU General Public License*, lo que permite modificar su código para adaptarlo a nuestras necesidades.

EMC2 proporciona:

- Diversas interfaces gráficas de usuario
- Intérprete de código G (Lenguaje de programación de máquina herramienta RS-274)
- Sistema de planificación de movimiento en tiempo real
- Manejo de la electrónica de la máquina a bajo nivel como sensores o controladores de motores

El sistema operativo usado utiliza extensiones de tiempo real para conseguir la correcta planificación de los movimientos. Estas extensiones se consiguen parcheando el kernel con extensiones de RT-Linux (Real Time Linux).

La comunicación entre EMC2 y PantoMax se realiza a través de la aplicación emcrsh. Esta aplicación consiste en un servidor Telnet capaz de recibir y ejecutar en EMC2 una serie de órdenes enviadas por un cliente Telnet. PantoMax simula una conexión por Telnet a emcrsh,

permitiendo el control de la máquina tanto en local como en remoto. Para la conexión en remoto será necesario alterar el código fuente con los nuevos parámetros de conexión, ya que en esta versión de la aplicación no se ha implementado el cambio de conexión en tiempo de ejecución.

Es importante destacar el grave bug encontrado en emcrsh. El bug consiste en una buffer overrun cuando se envían más de 1600 caracteres en una sola petición. Dado que se dispone de todo el código fuente de EMC2, se analizó el código realizado para esta aplicación en concreto. Se detectó que dos cadenas de caracteres estaban limitadas a 1600 caracteres, accediendo en caso de una cifra superior de caracteres en la entrada, a la posición 1601. Detectado y corregido este bug, se comprueba el correcto funcionamiento de emcrsh independientemente del tamaño de la entrada recibida.

La última versión de EMC2 hasta la fecha no cuenta con esta corrección, por lo que se notificará a la comunidad desarrolladora de la misma para que realicen la corrección para futuras versiones.

### 5.2.2. Visión general del diseño

La aplicación (Figura 82) se encuentra programada en C++ y contiene una única ventana sobre la que se pueden realizar todas las posibles acciones.

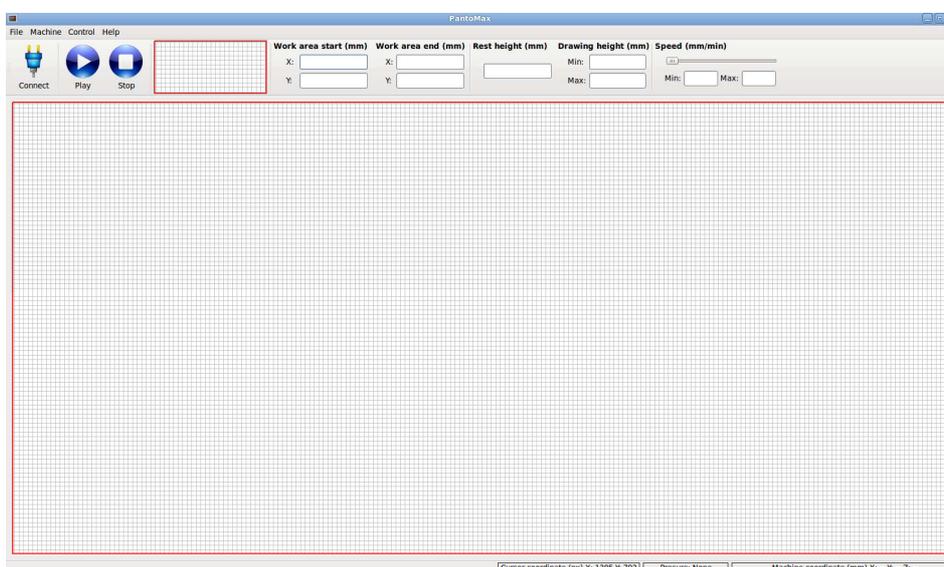


Figura 82: PantoMax

Podemos diferenciar las siguientes áreas en la ventana:

- Área de menú (Figura 83).

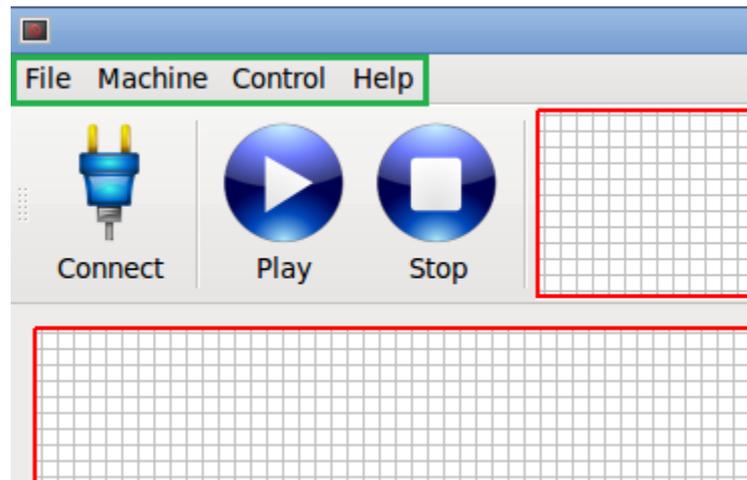


Figura 83: Àrea de menú

Hace uso de la clase QMenu y contiene los botones que permiten realizar las siguientes acciones:

- Guardado y cargado de dibujos realizados.
- Guardado y cargado de la configuración de la máquina.
- Control de la máquina (Conexión, puesta en funcionamiento y parada).
- Consulta de información sobre PantoMax.

■ Barra de herramientas (Figura 84).

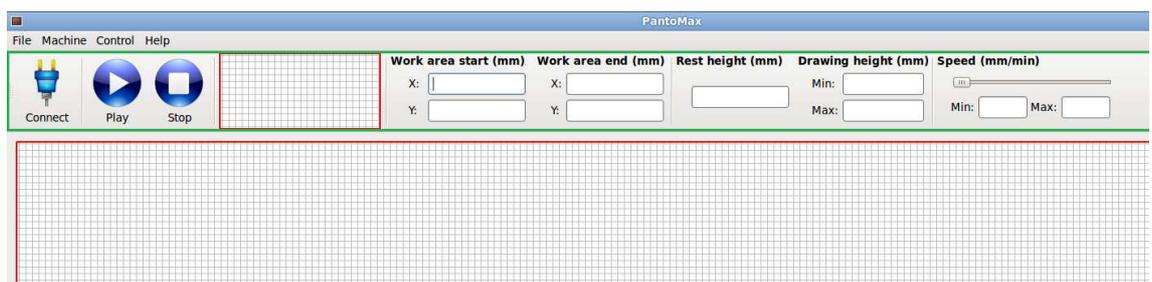


Figura 84: Barra de herramientas

Hace uso de la clase QToolBar y contiene los siguientes elementos:

- Botones para control de la máquina (Conexión, puesta en funcionamiento y parada).

- MiniArea (Widget propio), responsable de mostrar el área de trabajo actual respecto del área total de dibujo cuando realizamos zoom.
- Campos de texto editables que nos permitirán introducir toda la información necesaria para el correcto funcionamiento de la máquina CNC.
- Slider para configuración de la velocidad en un rango determinado.

■ Barra de estado (Figura 85)

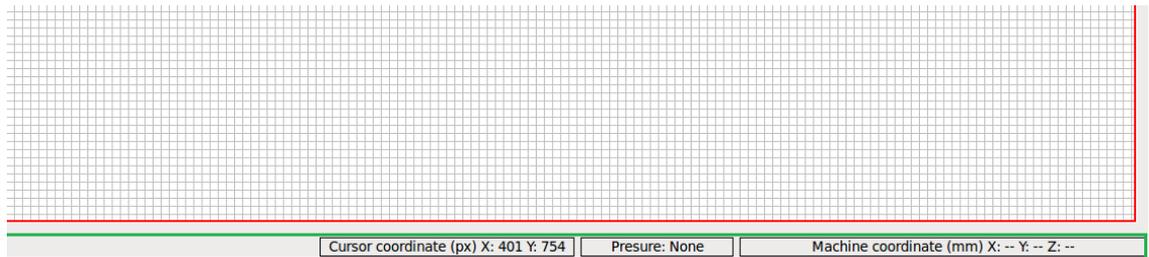


Figura 85: Barra de estado

Hace uso de la clase QStatusBar y posee las siguientes funcionalidades:

- Notificación de errores en el uso de la aplicación.
- Muestreo de la posición del cursor sobre el área de dibujo.
- Muestreo de la presión ejercida en la tableta gráfica en el rango de 0 a 1. El uso del ratón implica presión 0.
- Muestreo de las coordenadas actuales de la máquina.

■ Área de dibujo (Figura 86).

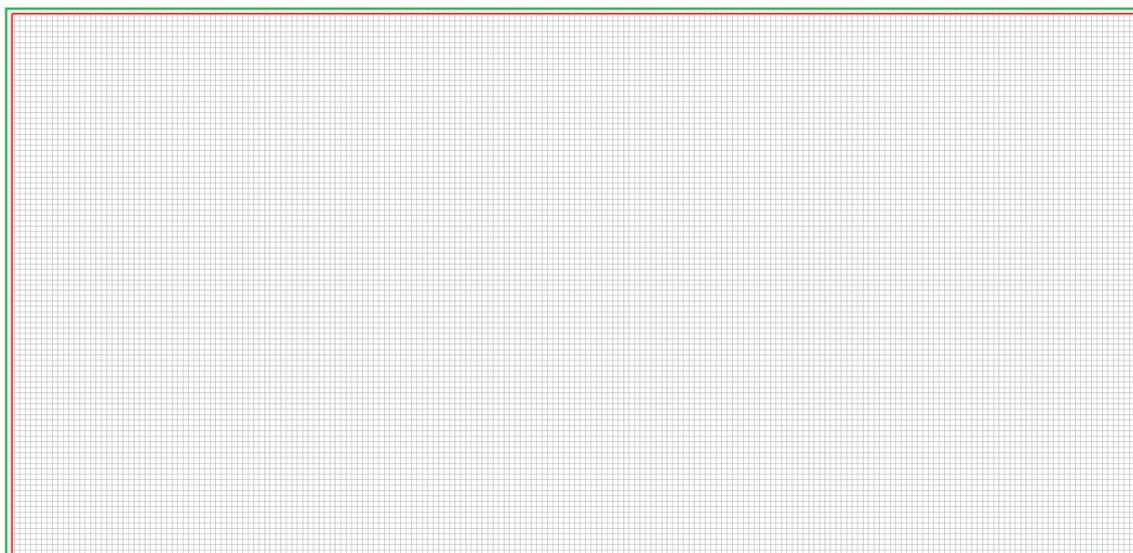


Figura 86: Área de dibujo

Hace uso de la clase ScribbleArea (Widget propio) y posee las siguientes funcionalidades:

- Realización de trazados por pulsación del botón izquierdo del ratón o por presión del estilete sobre la tableta gráfica.
- Realización y anulación de zoom vectorial por pulsación del botón derecho del ratón o por pulsación de un determinado botón de la tableta gráfica.
- Dibujado en tiempo real de la posición de la máquina.

### 5.2.3. Ejemplo de sesión de trabajo

En esta sección se describirá una sesión de trabajo en la que el usuario realizará trazados sin conexión a la máquina. Tras esto, procederá a la conexión con la máquina e introducirá o cargará los datos de configuración de la misma. Por último, realizará trazados con conexión a la máquina.

El usuario visualizará la ventana de la Figura 82 al abrir la aplicación. Inmediatamente podrá comenzar la realización de trazados sobre el área de dibujo. La Figura 87 muestra un ejemplo de este uso.

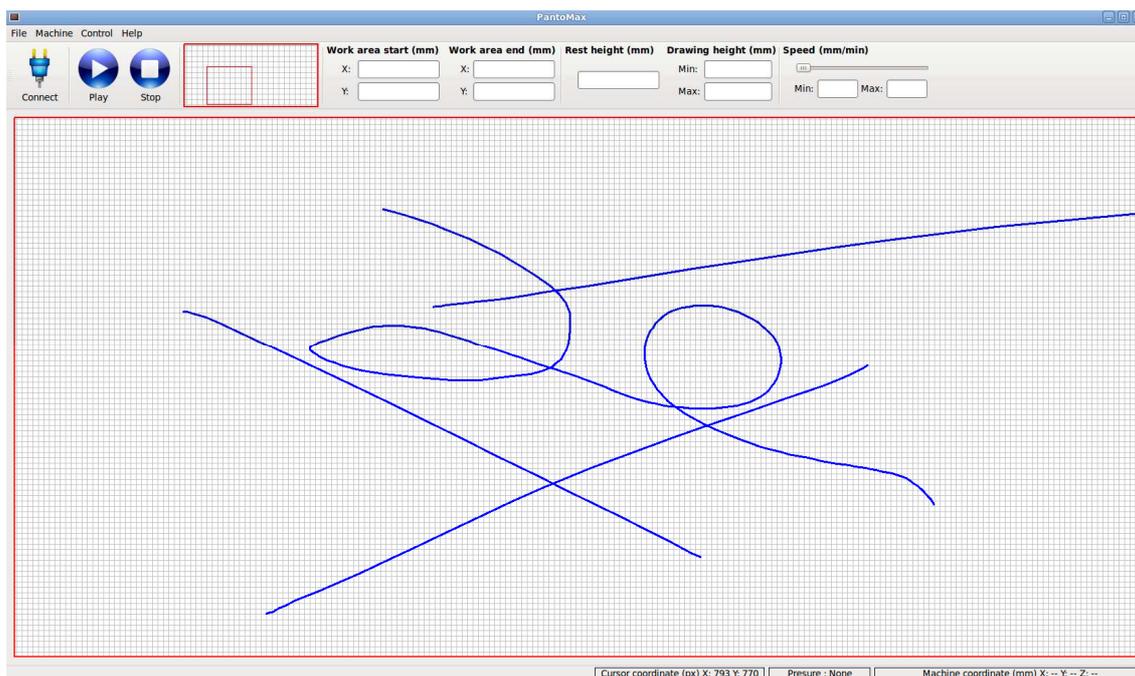


Figura 87: Trazados sin conexión a máquina

Se observa que el color de los trazados es azul, color que indica que los mismos han sido realizados por el usuario, ya sea por dispositivo apuntador o por carga de un fichero de dibujo. Además se puede apreciar la realización de un zoom por parte del usuario ya que el área con rejilla de la barra de herramientas contiene un rectángulo. Este rectángulo indica la posición y área de dicho zoom.

Tras haber realizado estos trazados, el usuario desea transmitirlos a la máquina. Para ello tendrá que proceder a la apertura de la aplicación EMC2 y pulsar el botón de conexión de PantoMax. Ya establecida la conexión el usuario procederá a la inserción de la configuración, ya sea mediante teclado o por carga de fichero de configuración. Finalmente pulsará el botón de puesta en funcionamiento, iniciando el movimiento de la máquina. En la Figura 88 se muestra una captura de pantalla segundos después de la puesta en funcionamiento.

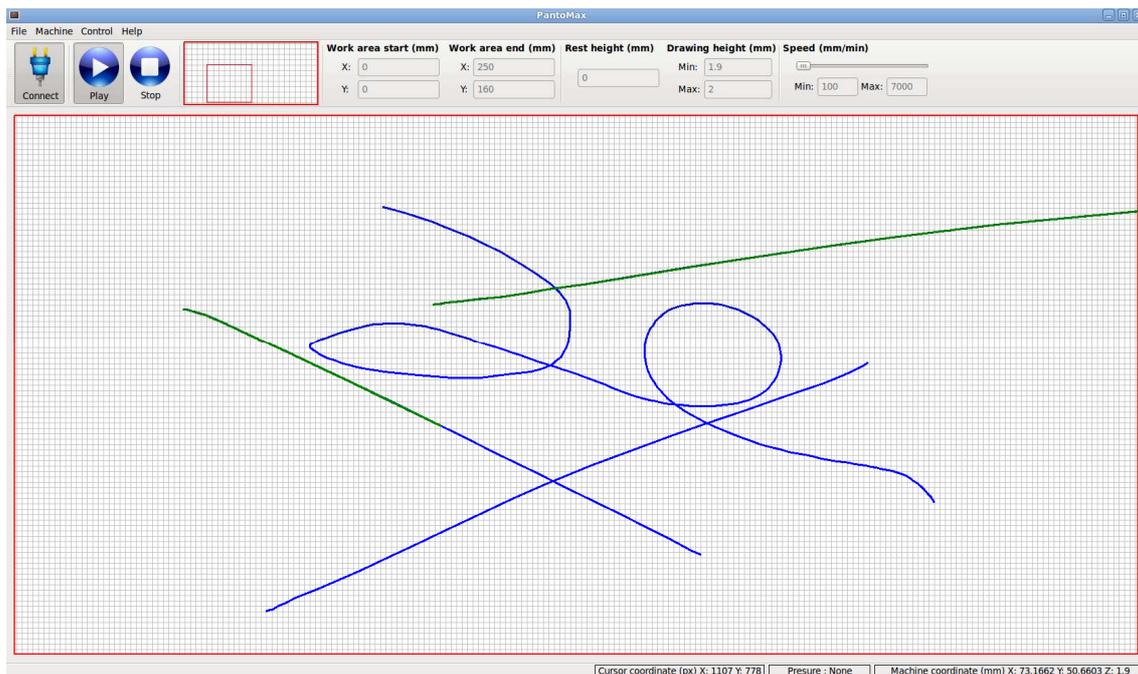


Figura 88: Trazados con conexión a máquina

Se pueden apreciar los nuevos trazados de color verde, color que indica el recorrido seguido por la máquina. Además se muestra la coordenada actual de la máquina en la barra de estado. El usuario podrá volver al modo de dibujo sin conexión pulsando el botón de detención, eliminando al mismo tiempo el recorrido realizado por la máquina en el área de dibujo.

### 5.2.4. Diagrama de clases

La Figura 89 indica el diagrama de clases de la aplicación (se excluyen clases de Qt):

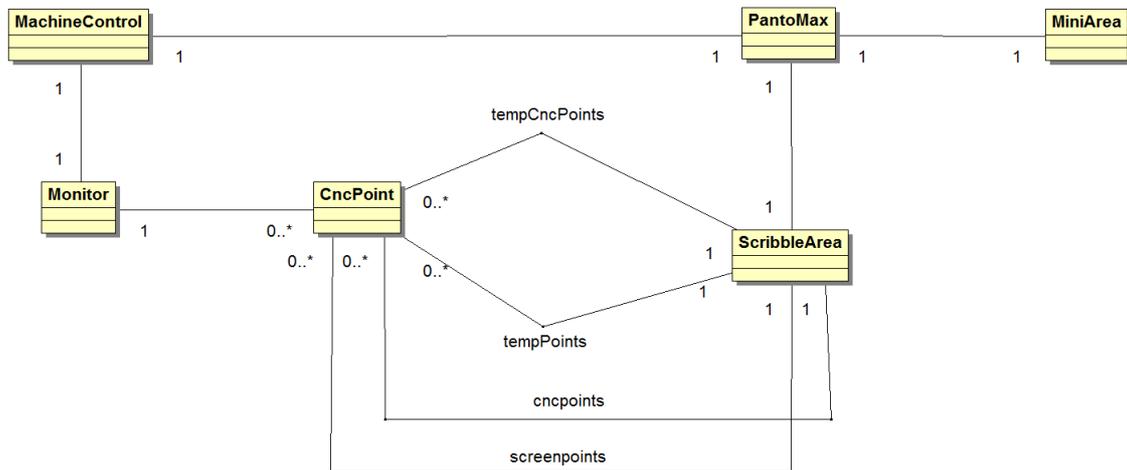


Figura 89: Diagrama de clases

A continuación presentamos una vista general de la estructura, comunicaciones y funcionamiento de la aplicación:

- **PantoMax:** Clase que contiene toda la información de la interfaz gráfica y sirve de puente de comunicaciones entre las diferentes clases que forman la aplicación, transformando o adecuando la información al destinatario. Implementa de forma parcial la lógica del menú, barra de herramientas y barra de estado.
- **MachineControl:** Clase responsable de las comunicaciones con la aplicación emcrsh. Usa la clase `QTcpSocket` para implementar la lectura de los datos enviados por emcrsh así como para el mantenimiento de la conexión realizada. Los datos recibidos son enviados a la clase `ScribbleArea` para su dibujado y a la clase `PantoMax` para su muestreo en la barra de estado.
- **Monitor:** Hereda de la clase `QThread`. En esta clase se delega la tarea de enviar las peticiones de monitorización de la posición actual de la máquina, así como de enviar las peticiones de movimiento de la herramienta encoladas (cola *points*). Las peticiones de movimiento se generan en la clase `ScribbleArea`, se transforman en la clase `PantoMax` y finalmente son recibidas por la clase `Monitor`. En el caso de dibujado offline será directamente la clase `PantoMax` quien envíe estas peticiones a la clase `Monitor`.

- CncPoint: Implementación de un punto tridimensional con un conjunto de métodos útiles para su integración en la aplicación.
- MiniArea: Widget de desarrollo propio. Hereda de la clase QWidget. Cada vez que realizamos un zoom en la zona de dibujo la clase ScribbleArea envía la orden de dibujado en la clase MiniArea.
- ScribbleArea: Widget de desarrollo propio. Hereda de la clase QWidget. Es la responsable de toda la gestión del dibujo, incluyendo zoom, captura de eventos de tableta gráfica o ratón, redimensionados, almacenaje en memoria de los trazados y un largo etcétera. Sus comunicaciones se establecen con todas las clases de la aplicación, ya que es el elemento central de la aplicación. Ante un evento de dibujado envía a PantoMax la orden de actualizar la barra de estado con los nuevos datos de posición del cursor y presión ejercida.

### 5.2.5. Clase PantoMax

Como ya se ha descrito anteriormente, esta clase contiene todos los elementos de la interfaz gráfica y sirve como puente de comunicaciones entre clases. Además implementa una gran diversidad de funcionalidades útiles para la aplicación:

- Guardado de dibujo realizado: Ante esta petición la clase PantoMax realizará una petición a la clase ScribbleArea de las coordenadas y presiones de los puntos actualmente dibujados y del tamaño del área de dibujo. Destacar el hecho de que únicamente se guardan los puntos dibujados por el usuario, ignorando los trazados realizados por la monitorización de la máquina. Obtenida esta información se procede a almacenar esta información en un fichero de extensión .pmd (PantoMax Draw) con el siguiente formato:

```
<ancho_área> <alto_área>
<x_punto_1> <y_punto_1> <presión_punto_1>
<x_punto_2> <y_punto_2> <presión_punto_2>
...
<x_punto_N> <y_punto_N> <presión_punto_N>
END
<x_punto_N+1> <y_punto_N+1> <presión_punto_N+1>
<x_punto_N+2> <y_punto_N+2> <presión_punto_N+2>
...
<x_punto_N+M> <y_punto_N+M> <presión_punto_N+M>
END
```

La primera línea siempre contendrá el tamaño del área de dibujo en el momento de guardado. La separación de atributos en una línea se realiza mediante el carácter espacio. Un salto de línea indicará un nuevo punto o el final del trazo (END).

- **Carga de dibujo realizado:** Ante esta petición la clase PantoMax añadirá a la clase ScribbleArea los puntos almacenados en el fichero. Destacar el hecho de que los puntos ya dibujados en el área de dibujo no se eliminan, únicamente se añaden los puntos cargados. Una vez finalizada la carga se envía una petición al área de dibujo para que muestre el nuevo contenido. Esta carga únicamente afecta a los puntos dibujados, no a los monitorizados en la máquina.

Puede suceder que las dimensiones del área de dibujo en el momento de la carga no sean las mismas que las almacenadas en el fichero, por lo que la clase PantoMax será quien realice las pertinentes transformaciones a los puntos.

- **Guardado de la configuración de la máquina:** La clase PantoMax comprobará en primer lugar la validez de los datos insertados en la barra de herramientas. De existir algún dato erróneo se informa al usuario de dicho error mediante la barra de estado. Una vez verificados los datos se procede a almacenar esta información en un fichero de extensión .pmc (PantoMax Configuration) con el siguiente formato:

```
<x_inicio_área> <y_inicio_área> <x_fin_área> <y_fin_área>  
<velocidad_mínima> <velocidad_máxima>  
<altura_reposo> <presión_mínima> <presión_máxima>
```

Al igual que en el fichero de dibujo, la separación de atributos en una línea se realiza mediante el carácter espacio.

- **Carga de la configuración de la máquina:** La clase PantoMax comprobará que la máquina no se encuentre en funcionamiento (botón *Play* no pulsado). De encontrarse en funcionamiento se notificará del error al usuario mediante la barra de estado. En caso contrario se procederá a la lectura del fichero y a la escritura de los valores leídos en las cajas de texto correspondientes.
- **Limpieza del área de dibujo:** Se comprobará que la máquina no se encuentre en funcionamiento (botón *Play* no pulsado). De encontrarse en funcionamiento se notificará del error al usuario mediante la barra de estado. En caso contrario se enviará una petición de eliminación de los puntos almacenados (tanto los dibujados como los monitorizados) a la clase ScribbleArea con un posterior refresco del área de dibujo.

- **Conexión/desconexión con emcrsh:** Se podrá realizar la conexión en cualquier momento. En caso de error se mostrará un mensaje en la barra de estado. En caso contrario el botón quedará pulsado, notificando de esta forma al usuario de la correcta conexión. La lógica de la conexión/desconexión será detallada en las funcionalidades de la clase MachineControl.
- **Puesta en funcionamiento:** Se podrá realizar esta acción una vez establecida la conexión con emcrsh. Si no se ha establecido la conexión se notificará el error al usuario. Si la conexión está activa se procede a la comprobación de los datos de configuración de la máquina insertados en la barra de herramientas. En caso de error se notificará al usuario mediante la barra de estado. En caso de éxito se deja pulsado el botón (indicando el funcionamiento de la máquina) y se procede a la lectura de todos los puntos realizados por el usuario en el área de dibujo.

Obtenidos estos puntos se transforman al sistema de coordenadas de la máquina y se envían a la clase MachineControl para que los encole en la cola de peticiones de la clase Monitor. Tras esto se envía una petición a la clase ScribbleArea para que calcule la coordenada central del área de dibujo y la envíe, previa transformación por parte de la clase PantoMax, a la clase MachineControl. Esta última acción producirá el centrado de la herramienta a la altura de reposo en el área de trabajo de la máquina, agilizando futuros movimientos.

- **Detención:** En caso de no encontrarse la máquina en funcionamiento no se realizará ninguna acción. En caso contrario se enviará a la clase MachineControl la petición de parada. Tras esto se procede a realizar una petición de borrado de los trazos monitorizados en la máquina, respetando los dibujados por el usuario. Eliminados estos puntos del área de dibujo se procede a refrescar dicha área.

### 5.2.6. Clase MachineControl

Esta clase es la responsable de las comunicaciones con la aplicación emcrsh. Usa la clase QTcpSocket para implementar la lectura de los datos enviados por emcrsh así como para el mantenimiento de la conexión realizada. Las principales funcionalidades de esta clase son:

- Establecimiento de la conexión: Establece una conexión TCP con emcrsh. Tras esto se envían las siguientes órdenes:

```
hello <contraseña_acceso> 1 1
set echo off
set enable <contraseña_habilitación>
set estop off
set machine on
set mode mdi
```

Se recomienda la lectura del anexo “Manual de emcrsh” para la correcta comprensión de las órdenes emitidas.

- Desconexión: Se envía la siguiente orden a través de la conexión TCP ya realizada:

```
quit
```

Tras esto se procede al cierre de la conexión TCP.

- Consulta del estado de la conexión: Se procede a consultar el estado de la conexión, devolviendo un valor booleano que indicará dicho estado.
- Detención del movimiento: Se envía la siguiente orden a través de la conexión TCP ya realizada:

```
set mode manual
```

Emitida esta acción se procede a la detención de la monitorización por parte de la clase Monitor.

- Inicio del movimiento: Se envía la siguiente orden a través de la conexión TCP ya realizada:

```
set mode mdi
```

Emitida esta acción se procede a la puesta en funcionamiento de la monitorización por parte de la clase Monitor.

- Recepción de datos recibidos de emcrsh: Cada vez que la conexión TCP lanza la señal *readyRead* se procede al tratamiento de los datos recibidos. El formato de los datos recibidos es el siguiente:

```
ABS_ACT_POS <pos_eje1> <pos_eje2> <pos_eje3>  
<pos_eje4> <pos_eje5> <pos_eje6>
```

La información de los 6 ejes se muestra en la misma línea, usándose como separación entre elementos el carácter espacio. Debido a que PantoMax funciona únicamente con tres ejes, solo trataremos los tres primeros valores. Estos valores serán enviados a la clase *ScribbleArea* para su dibujado y a la clase *PantoMax* para su muestreo en la barra de estado.

### 5.2.7. Clase Monitor

La clase *Monitor* hereda de la clase *QThread*, clase que permite crear hilos de ejecución. La implementación realizada de la clase *Monitor* actúa como un temporizador en el que cuando se cumple el tiempo fijado (señal *timeout*) se ejecuta una función, en nuestro caso el envío de las peticiones de monitorización de la posición actual de la máquina y las peticiones de movimiento de la herramienta encoladas. La explicación del uso de hilos reside en que no debemos bloquear la interfaz gráfica mientras se realiza la espera, bloqueo que sí sucedería de no separar la funcionalidad de monitorización a otro hilo.

Las principales funcionalidades de esta clase son:

- Encolado de punto: Se recibe una coordenada tridimensional respecto al sistema de coordenadas de la máquina y se encola para que sea emitido a emcrsh más tarde. Además, cada vez que se recibe un punto también se recibe la velocidad de desplazamiento a usar para todos puntos encolados.
- Parada de envío de puntos: Vacía la cola de puntos, lo que detiene de forma inmediata el envío de peticiones de movimiento.
- Monitorización de posiciones y envío de peticiones de movimiento: Ante la señal *timeout* del temporizador se realizan dos acciones:

- Petición de consulta de coordenadas actuales: Se envía a emcrsh el siguiente comando:

```
get abs_act_pos
```

La respuesta a esta petición será leída por la clase *MachineControl*.

- Envío de código G responsable del movimiento rectilíneo a las coordenadas especificadas (código G01): El comando emitido sigue el siguiente formato:

```
set mdi G01 X<coord_x> Y<coord_y> Z<coord_z>  
F<velocidad>
```

Las coordenadas del comando a enviar se obtienen de la cola de puntos. La velocidad se lee del atributo almacenado en la propia clase y se actualiza cada vez que se realiza la adición de un punto a la cola. Emc2 internamente encola estas órdenes de forma que se pasa a la ejecución de la siguiente orden únicamente cuando se ha finalizado la actual.

### 5.2.8. Clase CncPoint

La clase CncPoint implementa un punto tridimensional con un conjunto de métodos útiles para su integración en la aplicación. Estos métodos se reducen a diferentes combinaciones de definición y obtención de las coordenadas del punto.

Un aspecto a destacar de esta clase es su control para detectar una coordenada no definida. Dada la gran variedad de métodos de definición de coordenadas de la clase, es posible inicializar un punto sin valor y definir sólo una o dos de sus coordenadas. Las coordenadas no definidas tienen valor 0, por lo que no permiten deducir si han sido definidas o no. Para solucionar este problema se ha optado por la inserción de campos booleanos que indican si una coordenada está o no definida.

### 5.2.9. Clase MiniArea

Este Widget (elemento de la interfaz gráfica) de desarrollo propio hereda de la clase QWidget. Entre sus funcionalidades encontramos:

- Borrado del área: Vacía el área de dibujo del propio Widget, volviendo a dibujar la rejilla y el borde del área. ScribbleArea ejecutará esta funcionalidad cada vez que el usuario anule el zoom realizado.
- Dibujo de rectángulo en área: Se recibe las coordenadas del rectángulo en el sistema de coordenadas del Widget y se procede a su dibujado. Será la clase ScribbleArea la responsable del cambio al sistema de coordenadas de MiniArea. Esta funcionalidad se ejecutará cada vez que el usuario realice un zoom sobre el área de dibujo.

### 5.2.10. Clase ScribbleArea

Al igual que la clase MiniArea, ScribbleArea es un Widget de desarrollo propio. Hereda por tanto de la clase QWidget. Como ya se ha comentado anteriormente, esta clase es la responsable de toda la gestión del dibujo, incluyendo zoom, captura de eventos de tableta gráfica o ratón, redimensionados, almacenaje en memoria de los trazados y un largo etcétera.

Antes de proceder a describir las diferentes funcionalidades se tratará la metodología seguida para la realización de las transformaciones de los trazos dibujados. Es necesario tener en cuenta que las coordenadas de los puntos se almacenan en coma flotante, nunca en coordenadas enteras, aunque el propio evento del ratón o tableta gráfica nos devuelva un entero (devuelve las coordenadas del pixel sobre el que ha surgido el evento). El almacenamiento en coma flotante nos permite realizar todas las transformaciones sin perder prácticamente precisión. Será cuando necesitemos mostrar el dibujo cuando transformemos estas coordenadas en coma flotante a un mapa de pixeles con coordenadas enteras. Este es el funcionamiento básico de la representación vectorial.

Describimos sus principales funcionalidades:

- Redimensionado del área de dibujo: El redimensionamiento de la ventana produce también el redimensionamiento de este Widget. Debido a esto debemos realizar un escalado de todos los puntos contenidos en el área de dibujo, ya sean los realizados por el usuario o por la monitorización de la posición de la máquina.
- Realización de zoom: El usuario mediante la pulsación del botón derecho del ratón y su posterior movimiento será capaz de definir un área de ampliación (dibujado de un rectángulo) que va desde la posición donde se realizó dicha pulsación a la posición actual del cursor.

Ante el evento de dejar de pulsar el botón derecho se lanzará una tarea encargada de la progresiva ampliación del área seleccionada. Esta progresión se realizará con un temporizador con una frecuencia de 20 Hz y se detendrá cuando alcance los límites del Widget. El tiempo necesario para alcanzar este límite es de un segundo, por lo que supone 20 escalados en este lapso de tiempo. Estos escalados no se producen sobre los puntos originales, ya que los modificarían. En su lugar, se realiza una copia (cuando el usuario deja de pulsar el botón) y se procede a la transformación de esta copia.

Se pueden concatenar ampliaciones de forma que se puedan ampliar áreas muy pequeñas. Esta concatenación se produce aplicando sucesivamente transformaciones a las áreas de ampliación definidas por el usuario.

Por último se envía a MachineControl la petición de colocar a la máquina en el centro del área donde se ha realizado la ampliación, lo que agilizará futuros movimientos en esta área.

Destacar que la realización de zoom también se puede hacer desde la tableta gráfica usando el botón equivalente al botón derecho del ratón y el estilete.

- Anulación de zoom vectorial: El usuario únicamente tendrá que pulsar y soltar el botón derecho del ratón (o el botón equivalente en la tableta gráfica) para anular todos los zooms realizados. Este proceso se realiza dibujando todos los puntos almacenados (de usuario y monitorizados) con respecto al sistema de coordenadas del Widget.

Al igual que sucedía cuando realizamos zoom, se procede al centrado de la herramienta para esta nueva área de trabajo.

- Dibujo del trazado realizado por el usuario: La realización de un trazado se inicia con la pulsación del botón izquierdo del ratón o con el contacto del estilete con la tableta gráfica. Si el usuario realiza un movimiento mientras mantiene la pulsación/contacto se añaden los puntos capturados por el evento de movimiento del dispositivo y se dibujan en el Widget.

Cuando el usuario retira el estilete o deja de pulsar el botón izquierdo se añade el valor nulo a la lista de puntos, indicando el fin del trazo.

De encontrarse la máquina en funcionamiento, ante cada generación de punto se envía a la clase MachineControl una petición de movimiento.

- Dibujo del trazado realizado por la monitorización de la máquina: Si la máquina se encuentra en funcionamiento se dibujarán los trazados recibidos y se almacenarán en una lista diferente a la lista de puntos realizados por el usuario.
- Detección de la presión sobre la tableta gráfica: Gracias al evento QTabletEvent (compatible con tabletas gráficas Wacom) somos capaces de almacenar las presiones ejercidas para cada punto (coordenada z de la clase CncPoint). Este valor tiene un valor mínimo de 0 (valor obtenido con el uso del ratón) y un valor máximo de 1.

En caso de encontrarse la máquina en funcionamiento se transforman las presiones de la siguiente forma:

- Ausencia de trazado: La herramienta se encontrará a la altura de reposo especificada por el usuario.
- Trazado realizado con ratón: La herramienta se encontrará a la altura mínima especificada por el usuario.
- Trazado realizado con tableta gráfica: La altura de la herramienta se encontrará entre el valor mínimo (presión 0) y el valor máximo (presión 1).

- Monitorización de la posición del cursor: ScribbleArea realiza una continua monitorización de la posición del cursor sobre el área de dibujo, enviando a la clase PantoMax el nuevo valor de la posición del cursor para la actualización de la barra de estado de la aplicación.

## 6. Resultados

En la presente sección analizaremos los resultados obtenidos tanto para la máquina de control numérico fabricada como para PantoMax.

### 6.1. Máquina de control numérico

Antes de proceder con el análisis de los resultados obtenidos recordamos los objetivos planteados:

- Fácil fabricación: Las únicas acciones de mecanizado permitidas sobre el material que formará la estructura serán cortes y taladrados.
- Gran área de trabajo: El área de trabajo se encontrará entre el tamaño del estándar DIN A2 y DIN A3. El eje Z contará con un desplazamiento total de más de 250 mm, permitiendo el futuro acoplamiento de un cuarto eje.
- Precisión para cualquier tarea: La resolución de posicionamiento será de un mínimo de 5  $\mu\text{m}$ , siendo el error de repetitividad no superior a los 10  $\mu\text{m}$ .
- Gran velocidad de desplazamiento: La velocidad de desplazamiento para cada uno de los ejes será superior a los 6000 mm/min.
- Máquina de sobremesa: La máquina debe encontrarse dimensionada para poder colocarse en una mesa de escritorio y ser lo suficientemente ligera para no deteriorar la misma por su peso.
- Bajo coste: El coste total de los componentes que forman la máquina será inferior a los 1500€ (se excluye la computadora que realiza la función de control de la máquina).

Se ha realizado un exhaustivo estudio de uno de los aspectos más importantes de una máquina de control numérico, su repetitividad. Para ello se ha recurrido a un reloj comparador (Figura 90) con una precisión de 1  $\mu\text{m}$  (0.001 mm). Este dispositivo, ampliamente usado en la comprobación de máquinas de control numérico, nos servirá para detectar el error de repetitividad de cada uno de los ejes.

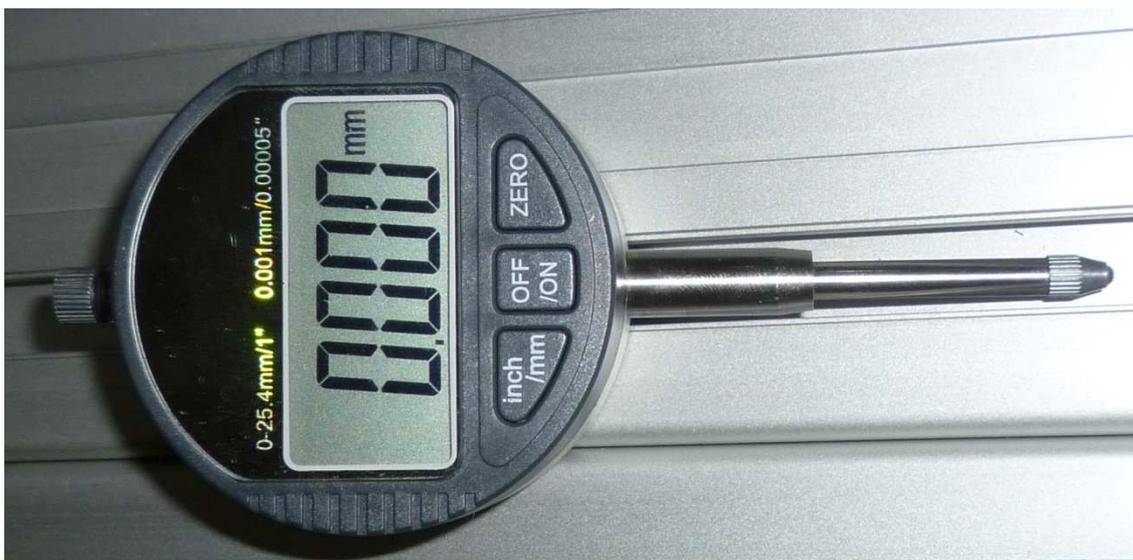


Figura 90: Reloj comparador

El funcionamiento de este dispositivo reside en leer la longitud desplazada de su eje móvil. Su uso en máquinas de control numérico consiste en posicionar la herramienta en una posición que desplace al eje (no importa cuanto lo desplace), retirar la herramienta del contacto del eje y repetir la operación. La obtención de un valor idéntico en cada repetición indica que la máquina de control numérico tiene una repetitividad superior a la precisión del reloj comparador. Valores dispares indican que para una misma coordenada la máquina posee una variabilidad (error) en su posicionamiento.

La metodología seguida para el estudio ha consistido en ordenar a la máquina el posicionamiento exacto de una coordenada, anotar el valor del reloj comparador (el desplazamiento del eje móvil del mismo) y retirar a la máquina de ese posicionamiento. Este proceso se repite 15 veces para cada eje.

Los datos obtenidos de estas pruebas son los de la Figura 91.

Valores	Z ( $\mu\text{m}$ )	X ( $\mu\text{m}$ )	Y ( $\mu\text{m}$ )
1	402	805	933
2	402	805	933
3	399	805	933
4	401	805	933
5	401	805	933
6	401	805	933
7	401	806	933
8	403	807	932
9	403	806	932
10	401	807	932
11	402	807	932
12	400	807	932
13	401	807	932

14	402	805	932
15	399	806	932
<b>Media</b>	401,20	805,87	932,47
<b>Desviación típica</b>	1,17	0,88	0,50
<b>Recorrido</b>	4,00	2,00	1,00

Figura 91: Mediciones del reloj comparador

Observamos como en el eje Y posiblemente se esté introduciendo un error por parte del equipo de medida, ya que no es frecuente la obtención de esos valores con esa secuencia. Una posible hipótesis es el desplazamiento del reloj comparador con las sucesivas comprobaciones.

Procedemos a analizar cada uno de los objetivos:

- Fácil fabricación: Se han cumplido todas las exigencias de fabricación planteadas, principalmente por el uso de un sistema constructivo mediante perfiles de aluminio.
- El área de trabajo de la máquina es la siguiente:
  - Eje Y: 49 cm (DIN A3: 42 cm)
  - Eje X: 40 cm (DIN A3: 29,7 cm)
  - Eje Z: 26 cm (Exigido: 25 cm)

Por lo que se cumplen los requisitos de área exigidos.

- Precisión para cualquier tarea: La resolución final de la máquina se obtiene dividiendo el paso del husillo (5 mm) por el número de pasos necesarios para dar una vuelta completa al eje del motor (2000). El valor obtenido es de 2,5  $\mu\text{m}$ , una resolución el doble de la exigida.

Respecto a la repetitividad, el estudio realizado demuestra unos valores muy por encima de los esperados, ya que en el peor de los casos (eje Z) se obtiene un recorrido de 4  $\mu\text{m}$  con una desviación típica de 1,17  $\mu\text{m}$ .

En la web <http://www.cncroutersource.com> se realiza una clasificación de máquinas de control numérico por rango de precios, incluyendo para cada rango la repetitividad esperada. Para un rango de precio de entre 450€ y 3000€ el error de repetitividad esperado es de 25  $\mu\text{m}$ , error muy superior al obtenido en este proyecto. Para obtener una repetitividad como la conseguida en nuestra máquina debemos pasar a un rango de entre 44000€ y 74000€. Destacar que las máquinas de este último rango son de tipo industrial, de grandes dimensiones y con capacidades de fabricación muy superiores a las de la máquina diseñada.

- Gran velocidad de desplazamiento: Se ha testeado la velocidad y aceleración máxima para cada uno de los ejes. La metodología seguida ha consistido en incrementar, desde el intérprete de código G, la velocidad y la aceleración para cada eje hasta la pérdida de pasos del motor. Los resultados son los de la Figura 92.

Eje	Velocidad (mm/s)	Velocidad (mm/min)	Aceleración (mm/s <sup>2</sup> )
Z	140	8400	3000
X	140	8400	3000
Y	140	8400	2000

Figura 92: Velocidades y aceleraciones admisibles

Estos datos son, en todo caso, superiores a los exigidos. Destacar el hecho de que el eje Y no tiene una aceleración tan alta como los otros ejes debido a que su carga es mucho mayor.

- Máquina de sobremesa: La máquina de control numérico diseñada ocupa un área aproximada de 75x67 cm, lo que permite que pueda ser instalada en una mesa sin que esta tenga que tener unas dimensiones especiales. En lo que respecta a su peso se alcanzan aproximadamente unos 45 Kg. Se podría considerar que es una máquina muy pesada, pero si tenemos en cuenta el peso de este tipo de máquinas nos daremos cuenta de que estamos ante una máquina de control numérico bastante ligera.
- Bajo coste: El coste total de la máquina asciende a los 1016,87 €, excluyendo impuestos. Si no poseemos ninguna de las herramientas exigidas, el desembolso será de 260,86 € para la adquisición de las mismas. En todo caso no se supera la cantidad fijada de 1500 € de la especificación de requisitos.

El aspecto final de la máquina es el mostrado en la Figura 93.

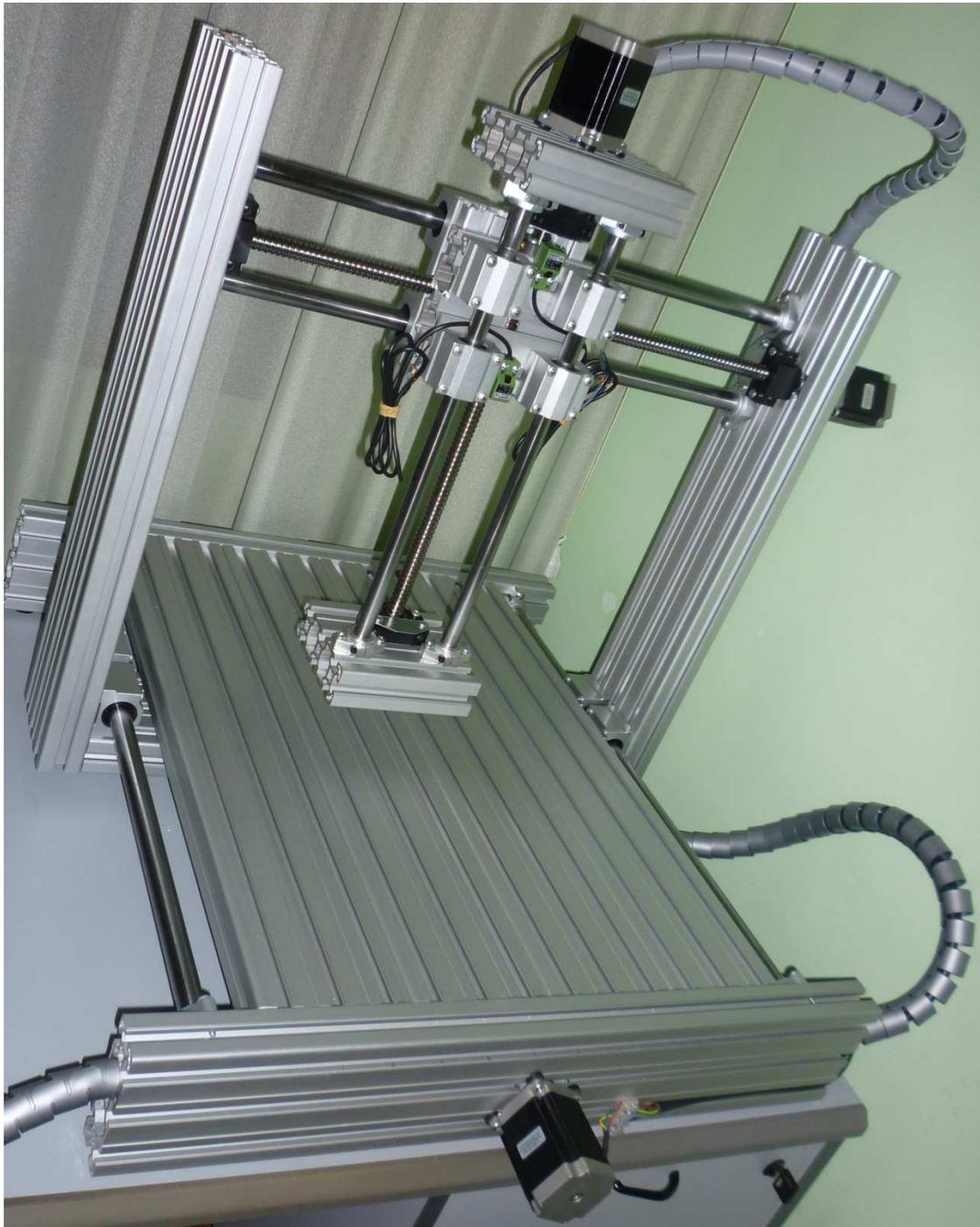


Figura 93: Aspecto final de la máquina CNC

En la Figura 94 podemos observar a la máquina preparada para empezar a realizar trazados con PantoMax.

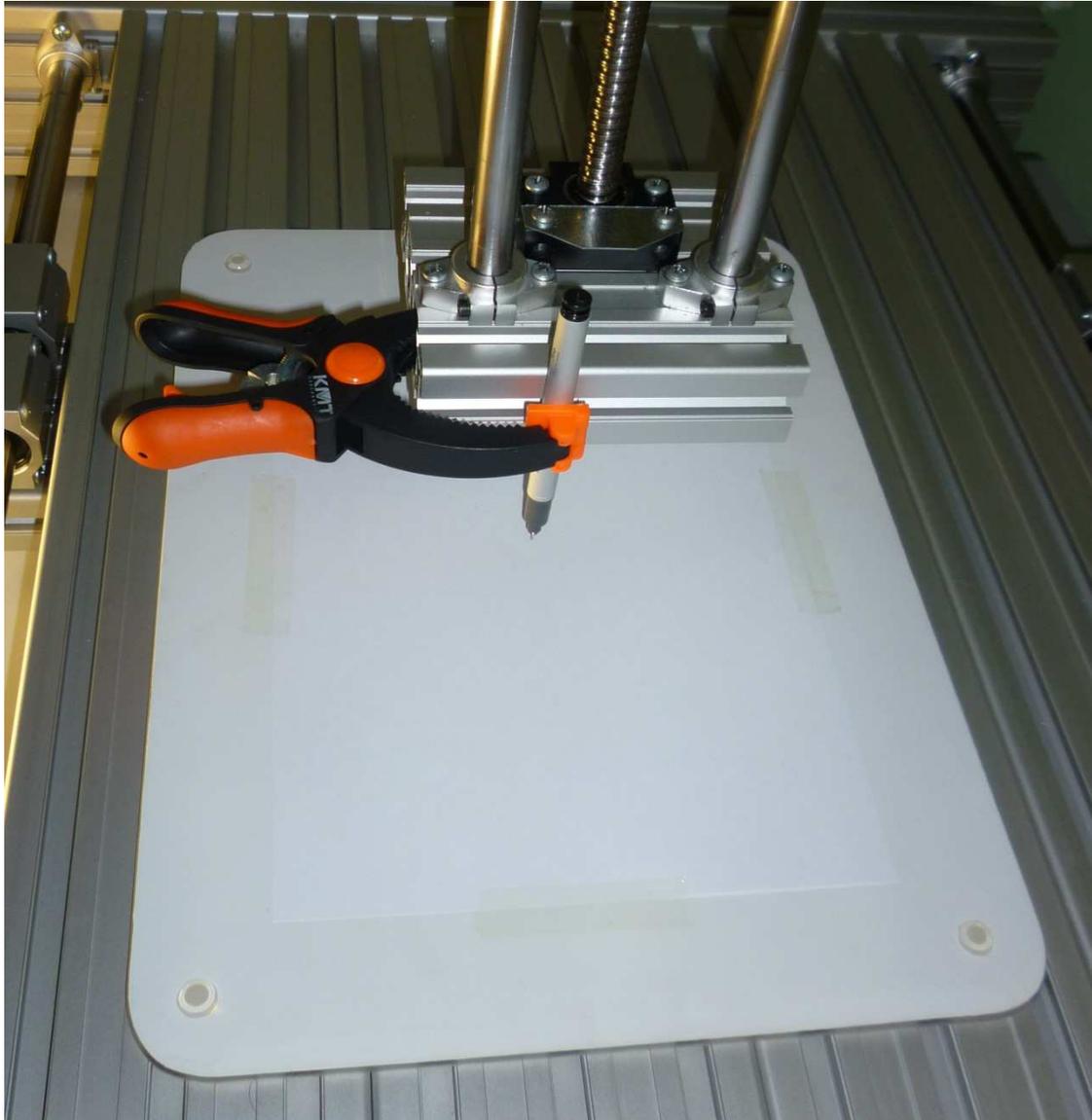


Figura 94: Máquina lista para dibujar

En la Figura 95 se muestra a la máquina de control numérico mientras realiza unos trazados con PantoMax.

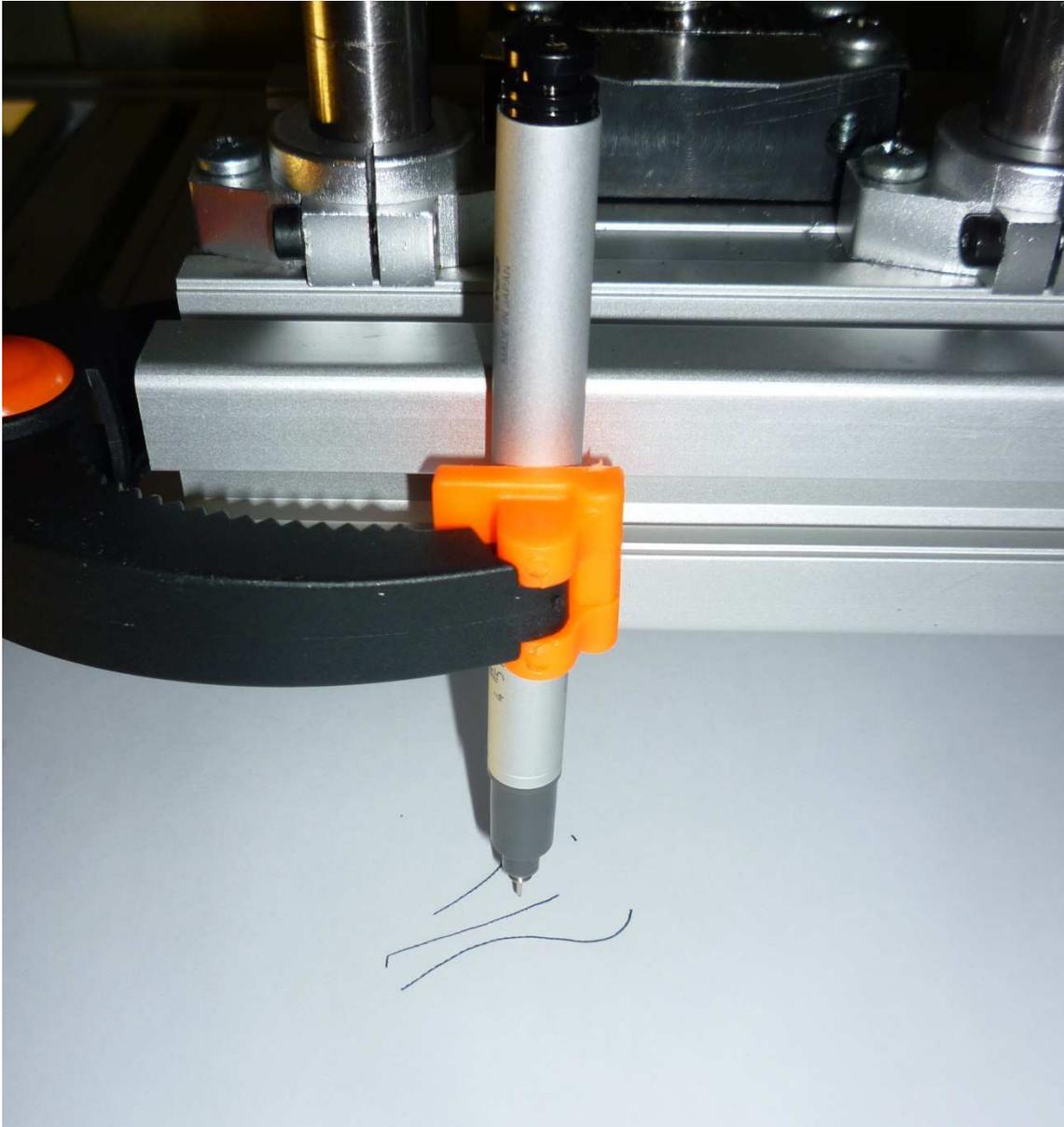


Figura 95: Máquina realizando trazados

## 6.2. PantoMax

Antes de proceder con el análisis de los resultados obtenidos recordamos los objetivos planteados:

- Aplicación para uso con dispositivo apuntador: Esta aplicación gráfica contendrá un área de dibujo sobre la que el usuario realizará trazados mediante un dispositivo apuntador. Estos trazados serán transmitidos a la máquina de control numérico.
- Si el dispositivo de entrada utilizado es una tableta gráfica, la presión ejercida será proporcional a la altura de la herramienta acoplada a la máquina.
- Integración con controlador máquina-herramienta: La aplicación de control manual desarrollada se integrará con un controlador de máquina-herramienta de código abierto.
- Control y monitorización en tiempo real: El control manual de la máquina y la monitorización de la posición de la herramienta acoplada será en tiempo real. En todo momento la aplicación mostrará la posición de la máquina y el diseño del usuario.
- Si la velocidad de posicionamiento de la máquina fuera inferior a la velocidad demandada por el usuario, se encolarían las acciones para ser realizadas más tarde. En la interfaz de usuario, un trazo de diferente color indicará el recorrido seguido por la máquina.
- Zoom vectorial: El usuario será capaz de realizar zoom en cualquier zona del área de dibujo, realizándose un escalado vectorial de dicha zona sin perder calidad.
- Capacidad de escalado: Gracias a la herramienta de zoom, el usuario podrá ampliar en el área de dibujo un área determinada del área de trabajo de la máquina.
- Guardado y carga del trabajo realizado: Se podrán guardar en disco los trazados realizados para su posterior carga en la aplicación.
- Guardado y carga de la configuración de la máquina: Al igual que con los trazados, se podrá guardar y cargar la configuración especificada para la máquina.
- Interfaz gráfica intuitiva: La aplicación dispondrá de una interfaz gráfica sencilla e intuitiva, permitiendo un rápido aprendizaje sobre el uso de la misma a personas no expertas en la materia.

Destacar que se han conseguido todos los objetivos holgadamente, aunque debemos hacer una aclaración respecto al control y monitorización en tiempo real. Para que una aplicación sea de tiempo real debe hacer uso de las extensiones de tiempo real del sistema operativo. PantoMax no hace uso de estas extensiones, lo que se traduce en que no podemos asegurar al 100% de que en un lapso de tiempo determinado se realizará una acción.

Los aspectos críticos de tiempo real para el control de la máquina son realizados por EMC2 usando las extensiones de tiempo real del sistema operativo. Es por ello que nuestra aplicación no requiere obligatoriamente de estas extensiones. La sensación que se da al usuario es de tiempo real, pero no hay que olvidar que un uso exhaustivo de la CPU por parte de otra aplicación provocará la pérdida de esta sensación.

## 7. Conclusiones

En el presente capítulo presentaremos las conclusiones tanto para la máquina de control numérico como para PantoMax. Adicionalmente se describirá el desarrollo seguido y se propondrán trabajos futuros para ambos proyectos.

### 7.1. Máquina de control numérico

El desarrollo de este proyecto se inició hace aproximadamente un año con la firme intención del autor de fabricar una máquina de control numérico profesional a un bajo coste. En este lapso de tiempo el desarrollo del mismo ha sido intermitente, ya que éste se ha combinado con la vida profesional como consultor del autor.

Entre los principales problemas encontramos la nivelación de los componentes de la máquina. Este proceso, dada la precisión buscada, puede ser muy tedioso. La solución encontrada es la nivelación por etapas, tal como se describe en el capítulo de diseño.

Otro problema frecuentemente encontrado durante el desarrollo de la máquina es la rotura de la rosca creada por los tornillos de rosca-chapa por el excesivo apretado de los mismos. La solución a este problema consiste en atornillar en ese orificio un tornillo de diámetro superior. Puede suceder que el diámetro del orificio sea demasiado pequeño para el nuevo diámetro del tornillo, por lo que en este caso se procedería a ampliar el orificio con una broca más gruesa.

Por último se encontró un problema de resonancia en frecuencias medias en los motores paso a paso utilizados. Este problema no pudo ser solucionado con la controladora implementada, por lo que se solucionó adquiriendo controladoras comerciales.

La principal conclusión que se obtiene de este proyecto es que es posible diseñar y construir una máquina de control numérico profesional sin excesivos medios y a un bajo coste. Esto implica poder llevar la fabricación mediante control numérico a particulares y no únicamente a empresas.

Como posibles trabajos futuros se plantea la adición de un cuarto eje a la máquina (permitiendo crear objetos de revolución), la creación de una máquina *pick and place* o la fabricación de una estación de soldadura infrarroja con autoposicionamiento de componentes.

## 7.2. PantoMax

El planteamiento de esta aplicación se realizó hace cinco meses con la intención de demostrar las capacidades de la máquina de control numérico fabricada, así como de proporcionar un método innovador de control manual en máquinas de control numérico.

Los problemas encontrados en el desarrollo de esta aplicación han sido múltiples. Como ya se había comentado, existe un bug en la aplicación emcrsh perteneciente a EMC2.

El bug consiste en una buffer overrun cuando se envían más de 1600 caracteres en una sola petición. Dado que se dispone de todo el código fuente de EMC2, se analizó el código realizado para esta aplicación en concreto. Se detectó que dos cadenas de caracteres estaban limitadas a 1600 caracteres, accediendo en caso de una cifra superior de caracteres en la entrada, a la posición 1601. Detectado y corregido este bug, se comprueba el correcto funcionamiento de emcrsh independientemente del tamaño de la entrada recibida.

La última versión de EMC2 hasta la fecha no cuenta con esta corrección, por lo que se notificará a la comunidad desarrolladora de la misma para que realicen la corrección para futuras versiones.

Otro problema encontrado en EMC2 es la metodología usada en la entrada MDI (Manual Data Input), entrada usada para el envío de las peticiones de posicionamiento por parte de PantoMax. El principal inconveniente que presenta esta entrada es que realiza una parada entre órdenes ejecutadas, reduciendo la velocidad de desplazamiento de la máquina.

Emcrsh también plantea el problema de encolamiento de acciones que no deben ser encoladas. Una de estas acciones es la de detención de la máquina. Esto impide poder parar la máquina de forma inmediata desde la aplicación PantoMax.

Por último se ha detectado un problema en la librería Qt. Esta librería implementa su propia versión de un temporizador, la clase QTimer. Se ha detectado un bug bastante grave en esta clase, ya que para temporizaciones del orden del milisegundo el consumo de CPU se dispara al 100% incluso con una función a ejecutar vacía. Por esta razón se ha optado por implementar nuestro propio temporizador, pasándose a un consumo inferior al 5% con el mismo periodo de tiempo.

La principal conclusión alcanzada de la realización de PantoMax es el hecho de que el control manual de las máquinas de control numérico puede realizarse con cualquier dispositivo apuntador, ya sea un ratón, una tableta gráfica o una interfaz táctil. Esto amplía el abanico de posibilidades de control manual, brindando más potencia y vistosidad a las máquinas de control numérico.

Como posible trabajo futuro se plantea la modificación de emcrsh para subsanar todos los inconvenientes que presenta. Además permitirá la entrada de datos por otra vía que no realice paradas entre órdenes ejecutadas.

## Anexo A: Manual de usuario

En primer lugar es necesario realizar una correcta instalación y configuración de EMC2. Para ello el usuario deberá seguir la guía de introducción a EMC2

([http://www.linuxcnc.org/docs/EMC2\\_Getting\\_Started.pdf](http://www.linuxcnc.org/docs/EMC2_Getting_Started.pdf)).

Una vez realizada la configuración, será necesario añadir la siguiente línea al principio del fichero de extensión .hal de nuestra configuración.

```
loadusr emcrsh {-- --port 5007 --name AHIP --connectpw PANTOMAX --enablepw PANTOMAX  
--sessions -1}
```

Además, si nos encontramos usando la versión 2.4.6 de EMC2 tendremos el problema del bug de emcrsh. Para solucionar este problema reemplazaremos el ejecutable emcrsh de la carpeta /usr/bin por el adjunto a este documento.

La versión todo en uno de EMC2 2.4.6 recurre a Ubuntu 10.04 para su funcionamiento. Esta versión del sistema operativo no soporta de forma nativa las nuevas tabletas gráficas de Wacom. La siguiente guía da solución a este problema:

<http://ubuntuforums.org/showpost.php?p=9496609>

El manual de usuario de PantoMax se encuentra en la subsección “Ejemplo de sesión de trabajo” de la sección de diseño del control manual. Destacar el hecho de que dicha subsección es un ejemplo de funcionamiento que despeja todas las dudas sobre el mismo.

## Bibliografía

1. CNC Zone Community. [En línea] <http://www.cnczone.com>
2. StepperWorld. [En línea] <http://www.stepperworld.com>
3. LinuxCNC Community & Wiki. [En línea] <http://linuxcnc.org/>
4. Build your CNC. [En línea] <http://buildyourcnc.com>
5. "Programación de Máquinas-herramienta con control numérico". Miguel A. Sebastián, Carmelo J. Luis. UNED.
6. "Manuales del control numérico CNC 8055 T y CNC 8055 M". Fagor.
7. "El control numérico y la programación manual de las máquinas herramientas con control numérico". J. Gonzalez de Ikerlan. URMO.
8. "Fabricación Asistida". Francisco Gonzalez, Pedro Rosado, Santiago Gutiérrez. Departamento de ingeniería mecánica y de materiales. Servicio de publicaciones de la UPV.