



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO AUTOMATIZADO
CONTROLADO POR SOFTWARE CAPAZ DE REALIZAR
FORMAS EN DOS DIMENSIONES SOBRE UNA SUPERFICIE
DE VIDRIO.**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

CHRISTIAN GABRIEL ARCINIEGA CLAVIJO

DIRECTOR: ING. GUILLERMO MOSQUERA, MSC.

Quito, Septiembre 2018

© Universidad UTE 2018

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1721622205
APELLIDO Y NOMBRES:	ARCINIEGA CLAVIJO CHRISTIAN GABRIEL
DIRECCIÓN:	Sebastián de Benalcázar N.- 777 conjunto New Castle casa #17
EMAIL:	chirisinc@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	02-3810527
TELÉFONO MOVIL:	0994751449

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Desarrollo de un prototipo automatizado controlado por software capaz de realizar formas en dos dimensiones sobre una superficie de vidrio.
AUTOR O AUTORES:	Christian Gabriel Arciniega Clavijo
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	11/09/2018
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Guillermo Mosquera, Msc
PROGRAMA:	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
RESUMEN:	El presente proyecto describe el desarrollo de un dispositivo que es capaz de realizar figuras en dos dimensiones sobre una superficie de vidrio automáticamente. Esta propuesta nació de la actividad artesanal de grabado en vidrio, que se realiza con una herramienta eléctrica que funciona como un lápiz y tiene una punta metálica que gira a grandes revoluciones conocida como fresa para grabar. El detalle y duración de esta tarea depende mucho de la habilidad y experiencia del artesano. Para principiantes

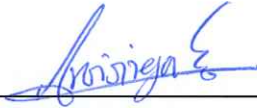
	<p>puede resultar difícil el realizar un trazado sobre vidrio, obteniendo figuras con poca calidad y esto es un contratiempo si se desea obsequiar un dibujo sobre este material. Con esto en mente se planteó que el uso de la máquina no sea industrial, sirviendo esta para crear decoraciones, presentes, placas o incluso trofeos. Para esto se usó la metodología mecatrónica definiendo un área de superficie de grabado de 20x20 cm, el uso de motores a paso y un sistema de coordenadas para la máquina. Después se hizo el diseño conceptual, desarrollando un mecanismo que permita a una punta de fresa trazar con una profundidad de 1.5 mm y con una velocidad aproximada de 14000 rpm; también se necesitó un sistema de actuadores que muevan a la herramienta de grabado sobre la superficie de vidrio. Se investigó el firmware GRBL para usarlo en una placa Arduino Uno, en conjunto con un Shield CNC. Se usó el software libre Inkscape 0.9.1 para la creación de trayectos a partir de imágenes. En la fase de diseño específico se escogió las opciones que mejor cumplan con las especificaciones propuestas y finalmente se construyó la máquina. Se sometió el proyecto a pruebas de grabado obteniendo un error de hasta 0.021153529mm en el trazado de un cuadrado, y de 0.026456305mm en un círculo</p>
PALABRAS CLAVES:	Grabado, vidrio, CNC, GRBL, Código G.
ABSTRACT:	This project describes the development of a device that is capable of making automatically bi-

dimensional figures over a glass surface. This proposal was born from the handmade activity of glass engraving, which is done with an electric tool that works like a pencil with a metal tip that rotates at high revolutions known as an engraving tool. The detail and duration of this task depends a lot on the skill and experience of the craftsman. It may be difficult for beginners to engrave on a glass surface; this can result in figures with poor quality, being this is an obstacle if you wish to give a drawing on this material as a present. With this in mind, the machine would not be made for the industry. Its primary focus is to create decorations, presents, plaques or even trophies. For this, the mechatronic methodology was used, defining a 20x20 cm engraving surface area, the use of stepper motors and a coordinate system for the machine. Then the conceptual design was made, developing a mechanism that allows an engraver point to trace with a depth of 1.5 mm and a speed of approximately 14000 rpm; a system of actuators that move the engraving tool over the glass surface was also needed. The GRBL firmware was investigated for use on an Arduino Uno board, with a CNC Shield. The free software Inkscape 0.9.1 was used to create paths from images. On the design phase, the options that best meet the specifications were chosen and finally the machine was built. The project was submitted to engraving tests and an error of up to 0.021153529mm was obtained in the drawing of a square, and 0.026456305mm in a circle

KEYWORDSEngraving, glass, CNC, GRBL, G
code

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f. _____



ARCINIEGA CLAVIJO CHRISTIAN GABRIEL

1721622205

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ARCINIEGA CLAVIJO CHRISTIAN GABRIEL**, CI 172162225 autor del proyecto titulado: **desarrollo de un prototipo automatizado controlado por software capaz de realizar formas en dos dimensiones sobre una superficie de vidrio** previo a la obtención del título de INGENIERO EN MECATRÓNICA en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, septiembre 2018

f: _____

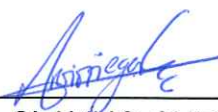

ARCINIEGA CLAVIJO CHRISTIAN GABRIEL

CI: 1721622205

DECLARACIÓN

Yo **ARCINIEGA CLAVIJO CHRISTIAN GABRIEL**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



ARCINIEGA CLAVIJO CHRISTIAN GABRIEL

C.I. 1721622205

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “Desarrollo de un prototipo automatizado controlado por software capaz de realizar formas en dos dimensiones sobre una superficie de vidrio.”, que, para aspirar al título de que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Christian Gabriel Arciniega Clavijo**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



Guillermo Mosquera Canchingre

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 0802613059

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Inés y Javier, por ser siempre mi mayor ejemplo a seguir a seguir y recordarme que ellos nunca me faltarán a lo largo de la vida que tengo por delante.

También a mi novia, Andrea, quien compartió conmigo todo este proceso de convertirme en profesional, entendiendo mi miedo a crecer para enfrentarme a la realidad y por levantarme todas las veces que caí recorriendo este camino.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las oportunidades que tuve para llegar a este momento. A mis padres, hermanos, novia y amigos que siempre me acompañaron en mis logros, locuras y fracasos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. METODOLOGÍA.....	7
2.1. Definición de requerimientos.....	8
2.2. Diseño Conceptual	8
2.3. Diseño específico	12
2.3.1. Diseño mecánico.....	12
2.3.2. Diseño electrónico.....	22
2.3.3. Diseño del control.....	25
2.4. Implementación del sistema	33
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5. ANEXOS.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Comparación DREMEL con Mini Dril DC 12 V Motor.....	12
Tabla 2. Valores para cálculo del torque	14
Tabla 3. Características del motor a pasos 28BYJ - 48	14
Tabla 4. Características tornillo sin fin.....	16
Tabla 5. Comparación entre motores a pasos propuestos.....	16
Tabla 6. Características de eje acerado	18
Tabla 7. Valores cálculo de carga total.....	18
Tabla 8. Valores para cálculo de condición de diseño	19
Tabla 9. Comparación entre microcontroladores propuestos.....	22
Tabla 10. Drivers para CNC Shield	23
Tabla 11. Valores obtenidos prueba de grabado de un cuadrado.....	36
Tabla 12. Valores obtenidos prueba de grabado de un círculo.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Máquina MCG – 2007	5
Figura 2. Sistema de Grabado con láser de CO2	5
Figura 3. Fresadora CNC de 3 ejes	6
Figura 4. Diagrama de requerimientos	8
Figura 5. Diagrama de bloques	9
Figura 6. Diagrama interno de bloques	10
Figura 7 . Diagrama de caso de uso	11
Figura 8. Diagrama de actividades.....	11
Figura 9. Mini Dril DC 12 V Motor	12
Figura 10. Muelas de diamante 2mm de diámetro	12
Figura 11. Juego de acople para fresa y motor DC	13
Figura 12. Polea GT2.....	13
Figura 13. Porta herramientas.....	15
Figura 14. Diagrama de bloques reestructurado	15
Figura 15. Base móvil eje Y	17
Figura 16. Análisis de carga sometido al tornillo sin fin	17
Figura 17. Simulación del eje	19
Figura 18. Estructura final de la máquina	21
Figura 19. CNC Shield	22
Figura 20. Gráfica de funcionamiento modo FULLSTEP	24
Figura 21. Esquema electrónico.....	25
Figura 22. Pantalla de Inicio Universal Gcode Sender	26
Figura 23. Ejecución del código G	27
Figura 24. Control de motores a paso	27
Figura 25. Diagrama de flujo configuración Arduino Uno	28
Figura 26. Diagrama de flujo para convertir una imagen digital a código G.....	29
Figura 27. Selección de imagen en Inkscape.....	30
Figura 28. Detección de bordes de la imagen	30
Figura 29. Selección de desvío dinámico	30
Figura 30. Puntos de Orientación.....	31
Figura 31. Selección de herramienta para grabado.....	31
Figura 32. Trayecto a código G.....	31
Figura 33. Cuadrícula para comprobación	32
Figura 34. Posicionamiento herramienta de grabado	32
Figura 35. Comprobación de pasos por milímetro.....	33
Figura 36. Mecanismos de movimiento para el sistema de coordenadas....	35
Figura 37. Máquina con mecanismo de grabado	35
Figura 38. Prueba de Grabado de un Cuadrado	36
Figura 39. Gráfica de comparación grabado de un cuadrado.....	37

Figura 40. Prueba de Grabado de un Círculo.....	37
Figura 41. Gráfica de comparación grabado de un círculo	38
Figura 42. Comparación de imagen grabada en vidrio	39

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1 Planos de la máquina grabadora de vidrio en dos dimensiones....	43

RESUMEN

El presente proyecto describe el desarrollo de un dispositivo que es capaz de realizar figuras en dos dimensiones sobre una superficie de vidrio automáticamente. Esta propuesta nació de la actividad artesanal de grabado en vidrio, que se realiza con una herramienta eléctrica que funciona como un lápiz y tiene una punta metálica que gira a grandes revoluciones conocida como fresa para grabar. El detalle y duración de esta tarea depende mucho de la habilidad y experiencia del artesano. Para principiantes puede resultar difícil el realizar un trazado sobre vidrio, obteniendo figuras con poca calidad y esto es un contratiempo si se desea obsequiar un dibujo sobre este material. Con esto en mente se planteó que el uso de la máquina no sea industrial, sirviendo esta para crear decoraciones, presentes, placas o incluso trofeos. Para esto se usó la metodología mecatrónica definiendo un área de superficie de grabado de 20x20 cm, el uso de motores a paso y un sistema de coordenadas para la máquina. Después se hizo el diseño conceptual, desarrollando un mecanismo que permita a una punta de fresa trazar con una profundidad de 1.5 mm y con una velocidad aproximada de 14000 rpm; también se necesitó un sistema de actuadores que muevan a la herramienta de grabado sobre la superficie de vidrio. Se investigó el firmware GRBL para usarlo en una placa Arduino Uno, en conjunto con un Shield CNC. Se usó el software libre Inkscape 0.9.1 para la creación de trayectos a partir de imágenes. En la fase de diseño especificó se escogió las opciones que mejor cumplan con las especificaciones propuestas y finalmente se construyó la máquina. Se sometió el proyecto a pruebas de grabado obteniendo un error de hasta 0.021153529mm en el trazado de un cuadrado, y de 0.026456305mm en un círculo.

Palabras clave: grabado, vidrio, CNC, GRBL.

ABSTRACT

This project describes the development of a device that is capable of making automatically bi-dimensional figures over a glass surface. This proposal was born from the handmade activity of glass engraving, which is done with an electric tool that works like a pencil with a metal tip that rotates at high revolutions known as an engraving tool. The detail and duration of this task depends a lot on the skill and experience of the craftsman. It may be difficult for beginners to engrave on a glass surface; this can result in figures with poor quality, being this is an obstacle if you wish to give a drawing on this material as a present. With this in mind, the machine would not be made for the industry. Its primary focus is to create decorations, presents, plaques or even trophies. For this, the mechatronic methodology was used, defining a 20x20 cm engraving surface area, the use of stepper motors and a coordinate system for the machine. Then the conceptual design was made, developing a mechanism that allows a engraver point to trace with a depth of 1.5 mm and a speed of approximately 14000 rpm; a system of actuators that move the engraving tool over the glass surface was also needed. The GRBL firmware was investigated for use on an Arduino Uno board, with a CNC Shield. The free software Inkscape 0.9.1 was used to create paths from images. On the design phase, the options that best meet the specifications were chosen and finally the machine was built. The project was submitted to engraving tests and an error of up to 0.021153529mm was obtained in the drawing of a square, and 0.026456305mm in a circle.

Keywords: engraving, glass, CNC, GRBL.

1. INTRODUCCIÓN

Se considera que el vidrio es uno de los materiales con mayor existencia dentro de la historia de la humanidad, su industrialización por el hombre ha tenido un alto número de aplicaciones, partiendo desde el uso más común, que son las ventanas para habitaciones, casas, edificios, también alejándose de las formas planas, tenemos vasos, envases, o bandejas sometidas a tratamientos para soportar el calor. De igual forma ya se tienen aplicaciones que tienen un carácter especial, como lentes para la visión, telescopio o microscopio (Pearson, 2010).

El grabado en vidrio es un proceso que se ha dado de manera manual. Si bien artesanos se apoyan en el uso de máquinas portátiles que giran a altas velocidades para rayar el material, estas dependen del pulso humano para realizar la actividad (Farinango & Yépez, 2007).

También se pueden encontrar grandes máquinas que dependen del uso de manivelas para mover la punta de grabado. Su eje de trabajo se encuentra perpendicular con el área del material. Al tener una superficie de trazado vertical, la remoción de la viruta generada por la interacción de la herramienta de grabado y la pieza de trabajo, resulta más fácil (Schey, 2000).

Se pueden hacer todo tipo de formas, desde líneas, letras, números, dibujos, retratos, o formas complejas. Sin embargo, estas pueden tener imprecisiones resultando en pequeños o grandes defectos en su producto final.

En el local "Aluminio y Vidrio Escobar", ubicado en el sector de La Armenia, se realizan trabajos de corte, esmerilado y grabado de vidrio; aquí se utiliza un grabador de vidrio tradicional que simula un lápiz, una persona puede demorar de 6 a 9 segundos en dibujar una letra en manuscrita; para una figura que requiera relleno y tenga dimensiones cercanas a los 15x15 cm, la tarea puede llevarse a cabo aproximadamente en 1.5 horas. El tiempo puede variar dependiendo de la complejidad de las formas, las dimensiones y la cantidad de relleno que el dibujo requiera. Sin embargo, la calidad del trazado va a depender de la persona y su experiencia realizando grabados.

Para esta actividad se puede recurrir al uso de moldes prefabricados con formas que, se usan habitualmente para seguir el trayecto del mismo y poder tener el grabado seleccionado. El tiempo disminuye casi a la mitad al momento de hacer letras, y en el caso de figuras complejas solo el contorno puede realizarse de 20 a 40 minutos. El problema de este método aparece al momento en el que se quiera hacer una nueva forma, y pueda requerir la elaboración de un nuevo molde.

Otro método usado es dibujar sobre el vidrio en bosquejo para después usar la herramienta de grabado y seguir la ruta previamente establecida. La calidad y la rapidez con la que se realicen el trazo manual y el grabado en vidrio, dependerá de la experiencia del artesano.

El grabado en vidrio es usado para decoración de vasos, pequeñas figuras iluminadas con luces LED, o placas que son usadas para reconocimientos o trofeos.

La realización de un prototipo de grabado en vidrio tendría como fin mejorar esta tarea. Al automatizar el proceso no se necesitaría un molde para cada forma o dibujar sobre el vidrio antes.

En la actualidad uno de los métodos más usados para posicionar un objeto dentro de un sistema de coordenadas es el control numérico. Con la creación de microcontroladores, y la implementación de software, al integrarse con el control numérico, nacen las máquinas de control numérico computarizado, o CNC por sus siglas, teniendo como máxima ventaja, la adaptación del código, es decir, modificarlos, en algunos casos directamente, desde la misma máquina (Kalpakian, 2008) (Marin, 2012).

Su uso no es limitado para un tipo de aplicación, se los puede usar en operaciones de maquinado como el corte, grabado, fresado, taladrado, soldado, entre otras. Además su control permite que la herramienta se mueva en cualquier dirección dentro de los ejes de trabajo para cumplir con los trayectos que la operación requiera cumplir (Perez, 2009).

Su aplicación final deseada no es para la elaboración masiva de un mismo diseño sobre superficies de vidrio, sino para la creación de decoraciones que puedan realizarse en corto tiempo, se modifiquen a gusto, puedan ser únicas y no necesiten de habilidad o experiencia en el grabado de vidrio.

Se tiene como referencia de sistemas parecidos al propuesto los siguientes proyectos:

- Maquina MGC-2007 desarrollada por Gabriel Blanco, José Gandara, Rogelio Galicia y Abraham Laguna.

Realizada para tener un uso industrial de corte y grabado de vidrio de dimensiones de 0.5m x 0.5m hasta 4.5m x 2.5m, cuenta con la transportación del material a la mesa de trabajo por medio de ventosas usando una bomba de vacío que permite levantar una carga aproximada de 535 Kg. Su estructura es la mostrada en la Figura 1. Para trasladarse en el plano usa tornillos sin fin y mecanismo de piñón – cremallera; el proceso de

grabado y corte usa dos herramientas diferentes, siendo ambas motores de corriente continua. Se programa los trayectos de la maquina mediante código G (Blanco, Gandara, Galicia, & Laguna, 2008).

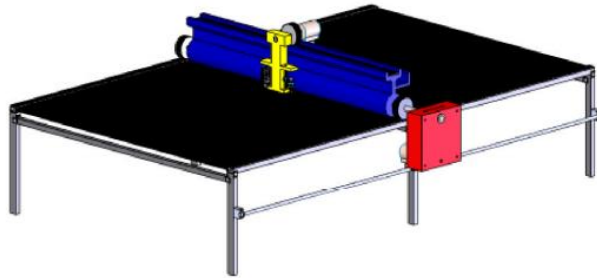


Figura 1. Máquina MCG – 2007
(Blanco, Gandara, Galicia, & Laguna, 2008)

- Sistema de grabado con láser de CO₂ desarrollado por David Vallejo.

Proyecto que se desarrolló con la capacidad de grabar en vidrio, madera, cartón cuero, tela, plástico y cerámica. Usa un sistema de movimiento cartesiano en dos dimensiones que se mueve gracias a la interacción de motores de paso y tornillos de potencia, con un marco de guía en sus extremos, como se observa en la Figura 2. El trazado en las diferentes superficies se da por un láser de CO₂ de 11.9 Watts con una eficiencia de 10.9%. Las formas a grabar son procesadas a través de un software que codifica la imagen en pixeles de forma binaria, y son enviados mediante el puerto serial de una computadora hacia un microcontrolador(Vallejo, 2007).

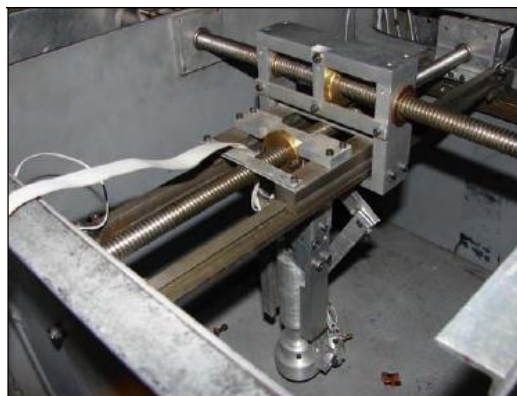


Figura 2. Sistema de Grabado con láser de CO₂
(Vallejo, 2007)

- Fresadora CNC de 3 ejes para el mecanizado de PCB con plataformas de desarrollo abiertas desarrollada por Miguel García.

Esta máquina automatizada tiene como fin el dibujar circuitos electrónicos sobre una placa de cobre mediante una herramienta de corte comercial (Dremmel 3000) acoplada al mecanismo. Para dar precisión a la operación se usa un sistema de ruedas de transmisión y guías movilizadas por motores a pasos con tornillos sin fin, y limitados por fines de carrera, Figura 3. La gran parte de software usado para el proyecto es libre uso(García, 2014).



Figura 3. Fresadora CNC de 3 ejes
(García, 2014)

En base a lo expuesto anteriormente se plantea el siguiente objetivo general:

- Desarrollar un sistema capaz de realizar formas en dos dimensiones sobre una superficie de vidrio a fin de sustituir el proceso manual de grabado.

De igual manera para cumplir con el objetivo general se planteó los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un sistema de movimiento automático en dos dimensiones.
- Seleccionar actuadores mecánicos para realizar el grabado y mover el sistema de grabado.
- Diseñar una interfaz de comunicación entre un computador y la máquina.
- Integrar los diferentes subsistemas para formar el sistema de grabado en dos dimensiones.
- Validar el sistema de grabado por medio de pruebas con diferentes figuras.

2. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto se aplicó la metodología mecatrónica. Esta tiene como primer paso la definición de requerimientos del proyecto. Para este caso se delimitó el área de trabajo total para la operación de grabado en vidrio. También se definió el modo de funcionamiento de la máquina y la herramienta para grabar. Se buscó un medio para interpretar la figura a ser dibujada.

En base a los requerimientos se realizó el diseño conceptual. Se propuso una estructura para la máquina. Se determinó el tipo de herramientas que se puede usar para trazar sobre una superficie de vidrio. Se definió sistemas de transmisión de movimiento angular a lineal. Finalmente, se escogió el método para convertir una imagen en información para el mecanismo de movimiento.

Con las soluciones planteadas se desarrolló el diseño específico, se comparó los mecanismos de movimiento. De igual manera, se realizaron pruebas para verificar que la herramienta escogida pueda trazar sobre la superficie de vidrio. La transmisión de movimiento debe ser capaz de mover todos los componentes de la máquina, mediante cálculos se comprobó que estos soportaron las cargas a los cuales fueron sometidos. Se seleccionó los actuadores mecánicos para los mecanismos de movimiento en los ejes de trabajo en base a la carga que pueden soportar y la corriente máxima de funcionamiento. Un microcontrolador con un número de entradas y salidas necesarias, tanto digitales como de PWM, se usó para interpretar la información de la imagen en trayectorias para los actuadores.

Una vez seleccionado los elementos electrónicos, mecánicos y de control que van a conformar el prototipo físico, se integró los mecanismos de transmisión de movimiento con los actuadores. Se acopló el mecanismo de grabado en uno de los ejes. Se conectaron los actuadores al microcontrolador, mismo que se comunicó con la computadora en donde se encuentra digitalizada la imagen a grabar.

Para validar el funcionamiento del proyecto se realizaron experimentos de trazado, sometiendo al dispositivo a dibujar dos figuras geométricas, un cuadrado y un círculo; se relacionará los puntos del trayecto dados por el código G y los obtenidos por los milímetros por paso de los motores en los ejes X y Y. Se aplicó el error cuadrático medio de la raíz para saber la aproximación del valor real frente al deseado

2.1. Definición de requerimientos

En base a lo planteado se muestra en la Figura 4 los requerimientos necesarios para la elaboración del proyecto. Se delimitó un área de trabajo de 20x20cm porque se desea que su aplicación sea para la creación de decoraciones o entrega de presentes. También se restringe el uso de herramientas comerciales para trazar en vidrio.

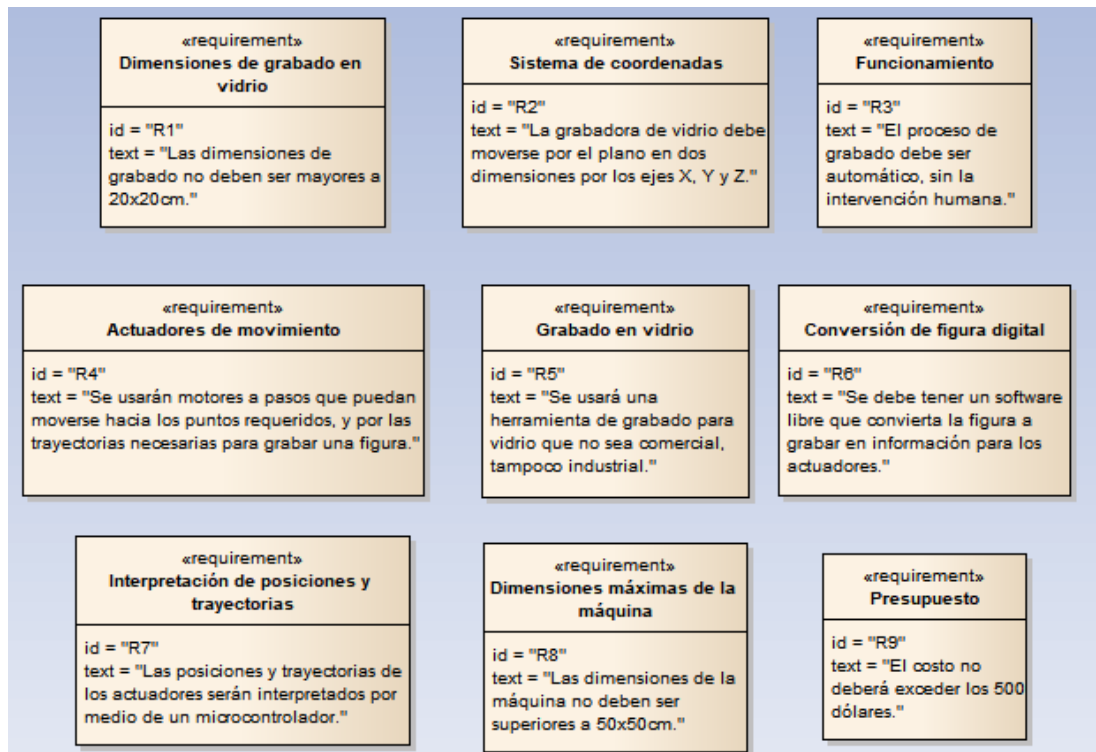


Figura 4. Diagrama de requerimientos

2.2. Diseño Conceptual

De acuerdo a lo investigado una máquina CNC es la más usada para procesos de grabado o fresado, esta permite controlar el movimiento de componentes en un sistema de coordenadas mediante software y una serie de órdenes. Para esto se utiliza el código G, mismo que consiste en líneas de comandos que detallan la posición que va a tener un mecanismo punto a punto dentro de los ejes X, Y y Z; también indican el tipo de movimiento que va a realizarse, por ejemplo una interpolación lineal o circular.

Para el movimiento en el sistema de coordenadas se planteó el uso de un tornillo sin fin con un eje en paralelo sosteniendo una base móvil. Este permite cumplir con los puntos y las trayectorias con del diseño de grabado con una precisión de 1mm por vuelta, si se trata de una rosca de 1 hilo, hasta 8mm por vuelta en un tornillo de 4 hilos.

Se escogió que los actuadores de movimiento sean motores a pasos, esto debido al torque de los mismos que permiten el movimiento aún bajo grandes cargas, manteniendo una posición fija solo energizando las bobinas. Al acoplarlos con tornillos sin fin se tendrá una relación para controlar cuantos milímetros se moverá la herramienta de grabado por cada paso que el motor realice.

Se seleccionó el uso de motores de corriente directa que existan en el mercado para grabar en vidrio, siempre y cuando estos no sean parte de una herramienta ya existente para la misma aplicación. Se descartó el uso de un grabador de vidrio láser puesto que, su costo es elevado comparado con un motor DC. Para el proceso de grabado es necesario un motor que tenga velocidades de entre las 10000 y 33000 rpm.

Se investigó los programas de software libre Inkscape versión 0.9.1 y DXF 2 G-CODE, ambos convierten un archivo digital en código G. Una vez obtenidas las trayectorias se cargará el archivo a la interfaz de comunicación entre la computadora y el microcontrolador.

Se representa en la Figura 5 la composición de la grabadora de vidrio. Esta presenta tres sistemas, uno electrónico, de control y mecánico. También se puede ver la cantidad de elementos que conforman cada uno de los sistemas.

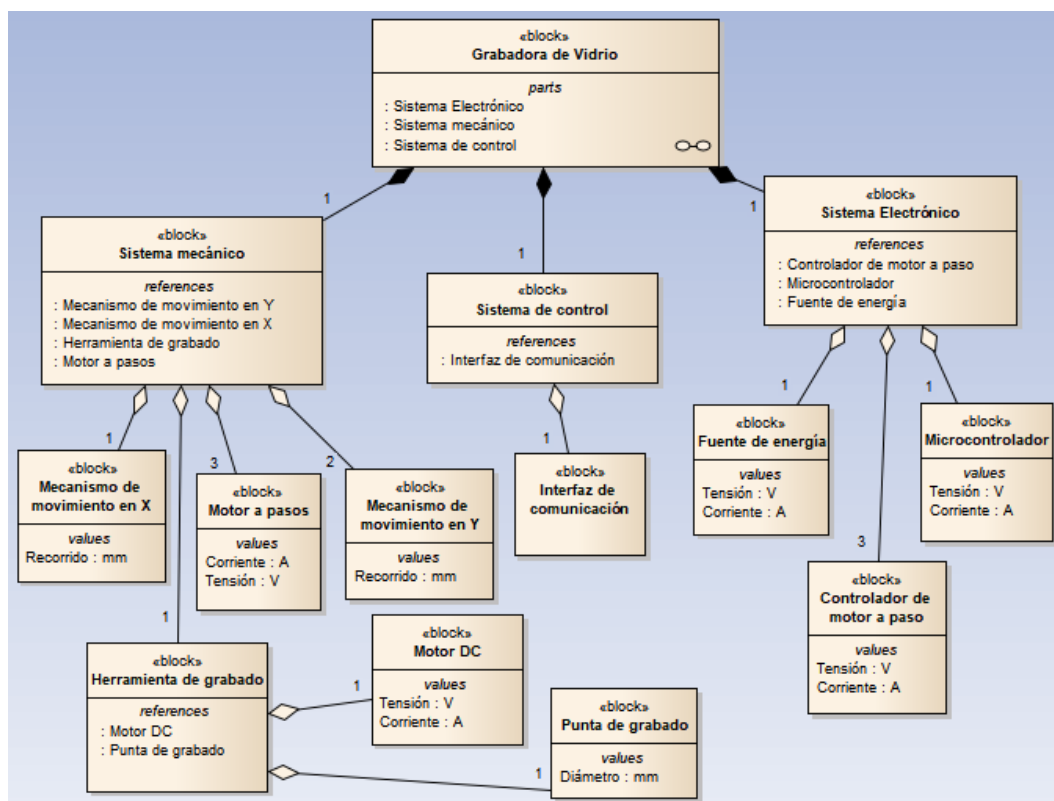


Figura 5. Diagrama de bloques

En la Figura 6 se muestra la interacción entre los componentes principales que tendrá la máquina. La interfaz de comunicación interactúa con el microcontrolador, mientras que este es alimentado por una fuente de energía. El microcontrolador envía una señal a los controladores de motores a pasos para moverlos. De esta manera los mecanismos de movimiento en X y Y trasladan a la herramienta de grabado sobre la superficie del vidrio.

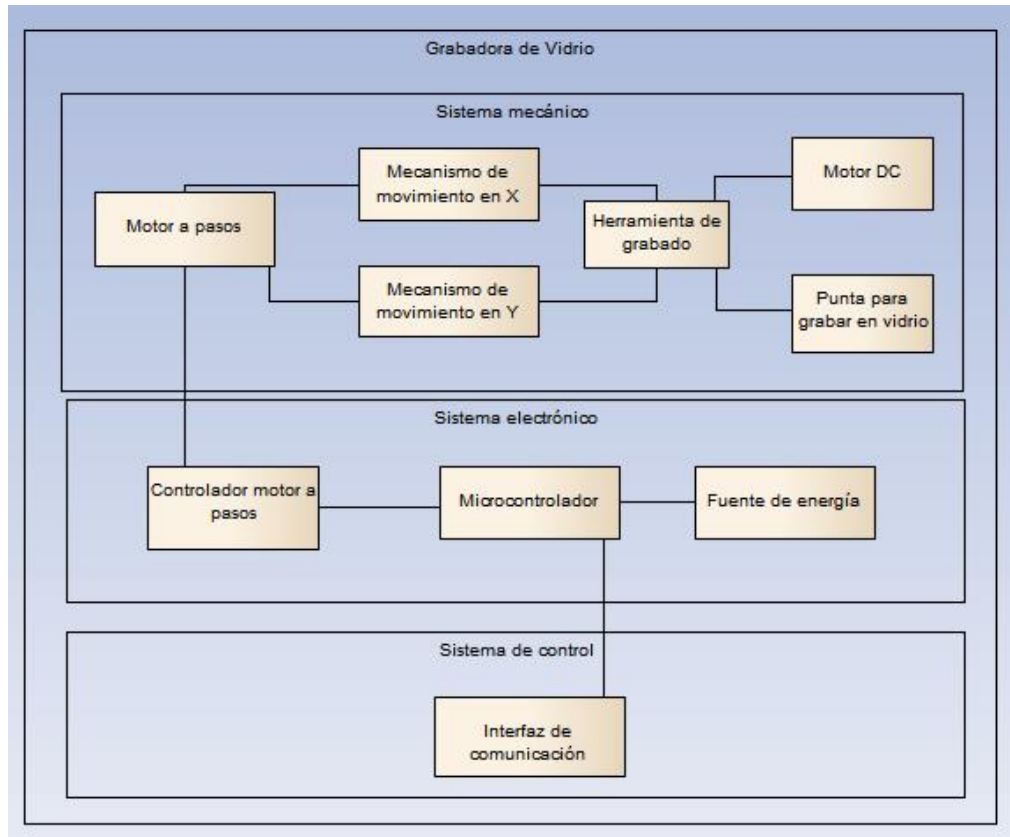


Figura 6. Diagrama interno de bloques

La persona que interactúe con la máquina además de realizar funciones como encenderla o apagarla, colocar o retirar el vidrio, podrá realizar grabado de forma manual manipulando la trayectoria de la herramienta mediante software. Adicional a esto, por medio de una interfaz podrá establecer una figura para ser grabada de forma automática. Se representa en la Figura 7 lo antes mencionado.

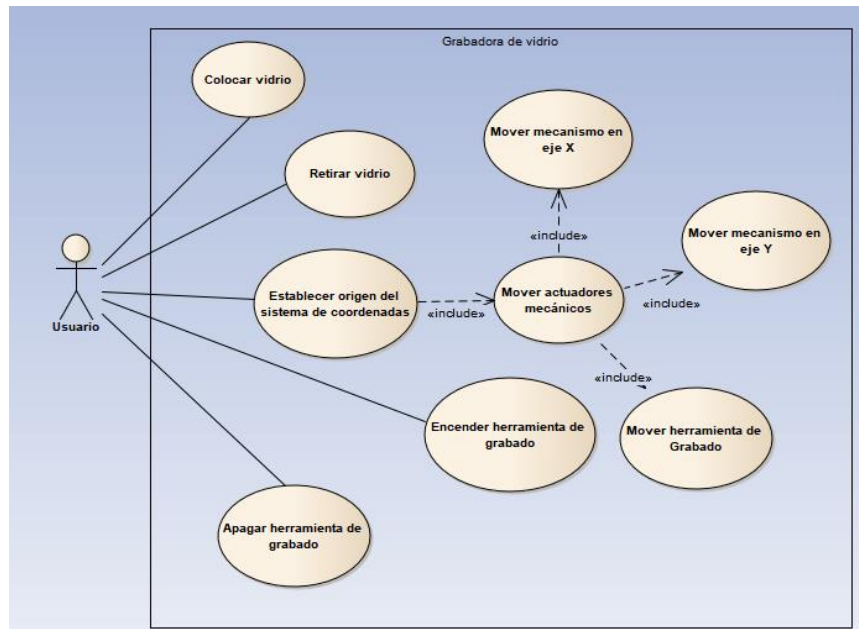


Figura 7 . Diagrama de caso de uso

La Figura 8 muestra el proceso de grabado en vidrio. Primero se tiene la imagen que se quiere grabar, esta es vectorizada y convertida a código G mediante software. Después este es cargado en la interfaz entre la computadora y el microcontrolador. Se coloca el vidrio en la base y se posiciona el origen de coordenadas sobre el mismo. La herramienta de grabado es movida por los actuadores mecánicos y al final dibuja lo deseado sobre el vidrio.



Figura 8. Diagrama de actividades

2.3 Diseño específico

2.3.1. Diseño mecánico

Debido al requerimiento para la selección de la herramienta, se descartó el uso de un grabador de vidrio comercial y un grabador laser. Sin, embargo, en la Tabla 1 se comparó un motor DC con la máquina DREMMELEL 300 series (300 - 30).

Tabla 1. Comparación DREMMELEL con Mini Dril DC 12 V Motor

Herramienta	DREMMELEL	545 DC Mini Drill DC 12V Motor
Peso	0.55 Kg	82 g
Velocidad al vacío	10000 - 33000 rpm	14000 rpm a 12V
Alimentación	110 VAC	6V - 12V

(DREMMELEL, 2018) (Kinmore, 2018)

En la Figura 9 se muestra el motor DC .mencionado en la Tabla 1.



Figura 9. Mini Dril DC 12 V Motor

(Kinmore, 2018)

En complemento se utilizan muelas de diamante, mostradas en la Figura 10. También existen fresas de carburo y puntas de amolar de carburo de silicio. El diámetro depende del grosor del trazado que una persona quiera tener para su dibujo.



a. Punta redonda

b. Punta fina

Figura 10. Muelas de diamante 2mm de diámetro

(DREMMELEL, 2018)

Se necesita un porta herramienta que se acople con el motor y transmita la rotación a la punta de fresa como se muestran en la Figura 11. Este tiene tornillos para ajustarse al eje del motor y un juego de mandriles para sujetar las fresas.



Figura 11. Juego de acople para fresa y motor DC
(DIYWorldDecor, 2018)

La herramienta de grabado realiza la operación de maquinado perpendicular a la superficie de vidrio; por este motivo la muela de diamante con punta redonda fue seleccionada para realizar el trazado. Las puntas finas ayudan a tener un dibujo con líneas angostas, sin embargo, son usadas igual que un lápiz y requieren de una leve inclinación para que se pueda visualizar el grabado sobre la superficie de vidrio.

Para poder levantar la herramienta de grabado se necesitó un motor a pasos que pueda levantar el combinado de peso del motor DC, el porta herramientas y la fresa, siendo el total 93g.

Este movimiento será mínimo, solo se necesita subir y bajar la herramienta hasta llegar a la superficie del vidrio. Para esto se usará un piñón GT2 de 20 dientes, mostrado en la Figura 12. Este se elevará con una cremallera plástica de 2mm de paso por diente y de 12.55 cm de largo.



Figura 12. Polea GT2
(ArteMecatrónica, 2018)

Mediante la ecuación 1 se comprobó el torque necesario para levantar el peso total de los componentes para el mecanismo de grabado, utilizando el largo de la cremallera plástica (Serway & Jewett, 2015).

$$\tau = F \cdot d \quad [1]$$

Dónde:

- τ es el Torque
- F es la fuerza en gramos-fuerza.
- d es la distancia en centímetros

En la Tabla 2 se muestran los valores usados para calcular el torque.

Tabla 2. Valores para cálculo del torque

F	93gf
d	12.55cm

Como resultado se necesitó un torque de 1167.15gf.cm, para esto se encontró que el motor a pasos de la Tabla 3 puede levantar y bajar el mecanismo de grabado en el eje Z, de igual manera, se puede acoplar el piñón de la Figura 12 al eje del mismo.

Tabla 3. Características del motor a pasos 28BYJ - 48

28BYJ-48	
	
Alimentación	5 VDC
Corriente Máxima	0.55 mA
Torque	600 - 1200 gf.cm
Pasos por vuelta	8

(Prometec, 2018)

En la Figura 13 se muestra el diseño del porta herramientas, con el motor a pasos, la polea, la cremallera y la herramienta de grabado integrados.

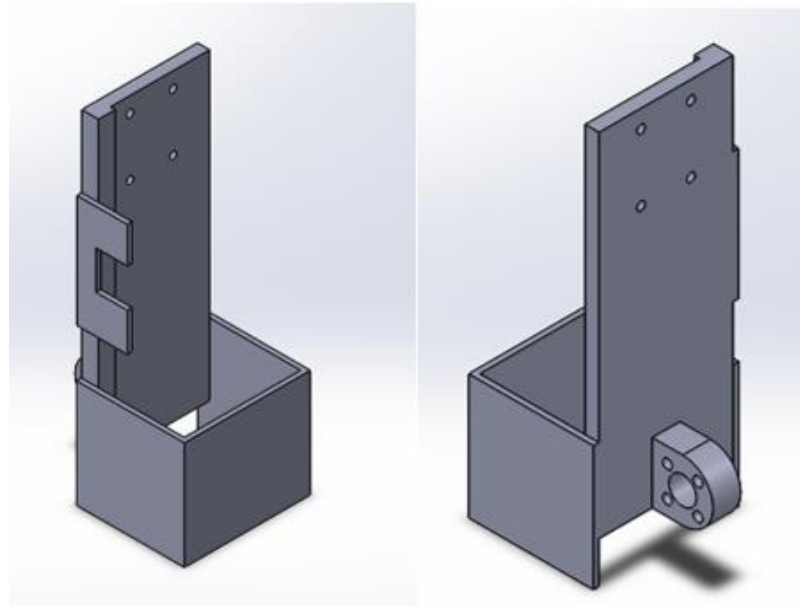


Figura 13. Porta herramientas

Debido a que se necesita otro motor a pasos, también se requiere otro driver para el mismo. Por este incremento de componentes cambió la estructura de la máquina mostrada en la Figura 5. El nuevo diagrama se muestra en la Figura 14.

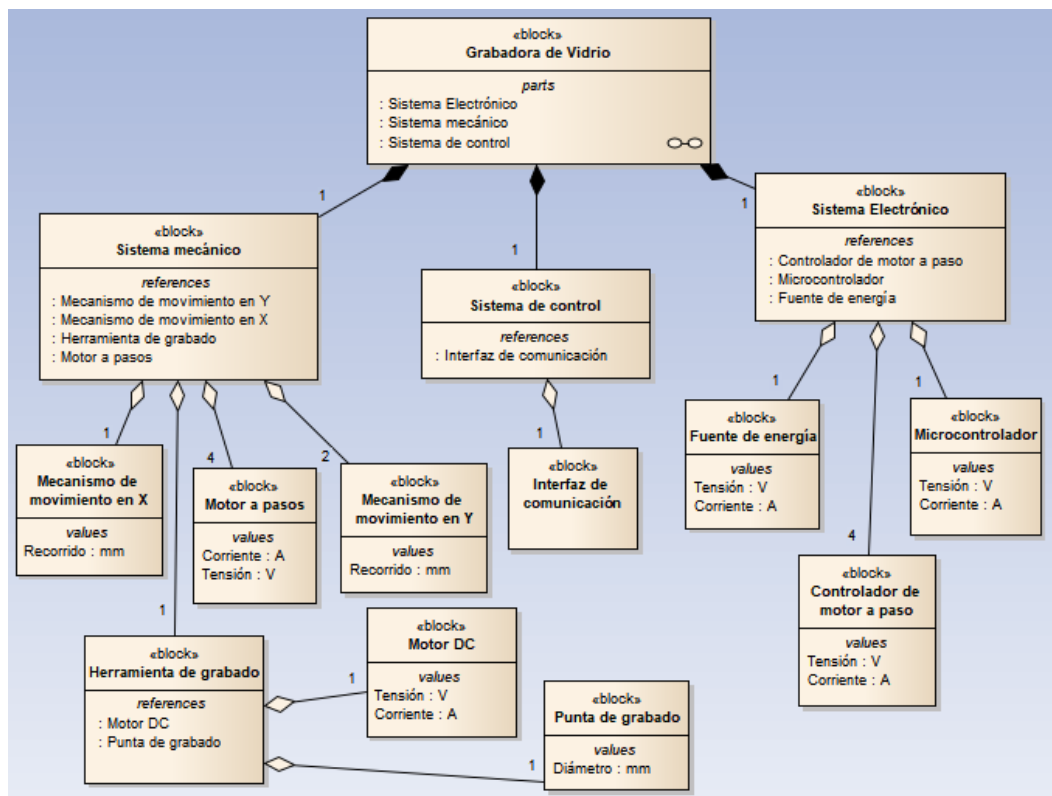


Figura 14. Diagrama de bloques reestructurado

Para el movimiento en los ejes X y Y se seleccionó un tornillo sin fin, existe en el mercado uno comercial que tiene una longitud superior al área de trabajo delimitada en los requerimientos. Para que pueda moverse totalmente sobre el vidrio se encontró un tornillo con las características de la Tabla 4.

Tabla 4. Características tornillo sin fin



Longitud	300 mm
Diámetro	8 mm
Material	Acero inoxidable AISI 316
Número de hilos	4
Milímetros por vuelta	8 mm
Peso	91g

(BangGood, 2018)

Para comprobar que este tornillo sin fin puede ser usado en la máquina primero se seleccionó el resto de elementos que estará soportando, como los motores a paso y las bases móviles. También el peso de este fue usado para verificar que los componentes antes mencionados sean aptos para moverse en el sistema de coordenadas.

A fin de cumplir con las trayectorias se usaron motores a pasos. En la Tabla 5 se tiene la comparación de dos opciones para el prototipo. Estos acoplados con el tornillo sin fin permiten un movimiento de milímetros por vuelta que ayudan al control de los puntos de grabado. Para la selección del mismo se consideró las cargas que se tendrán en el eje Y. Según el diseño de la maquina en este se encuentra soportado otro motor a pasos para el movimiento en X, el tornillo sin fin y una base móvil que fue impresa en 3D con material PLA.

Tabla 5. Comparación entre motores a pasos propuestos

	Nema 17 2.4 Kg/cm	Nema 23 14 Kg/cm
Tipo de motor		
Alimentación	7 – 12 V	2 – 5.5 V
Corriente Máxima	0.4A	2A
Carga Máxima	2.4 kg/cm	14 Kg/cm
Peso del motor	192g	1.1kg

(BricoGeek, 2018)

El motor Nema 17 soportará una carga de 283g, mientras que el Nema 23 una de 1191g. Debido al consumo de corriente y la carga máxima que puede soportar se usó el motor Nema 17, uno para el eje X y dos para el eje Y. Se diseñó la base móvil de la Figura 15 para este motor, esta tiene un peso de 149g; sumado al motor y al tornillo sin fin da como resultado 432g. Manteniéndose en el rango de carga máxima del motor a pasos seleccionado.

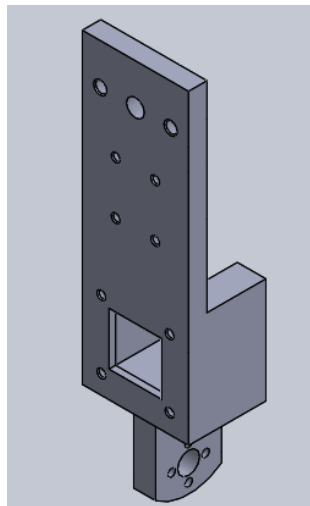


Figura 15. Base móvil eje Y

Finalmente se realizó el análisis de deformación que tendrá el tornillo mediante la simulación mostrada en la Figura 16. Se usó la carga de 482g como resultado de la selección de los componentes. Se obtuvo una deformación de 0.00857mm que no resulta significativo y puede ser utilizado para la transferencia de movimiento.

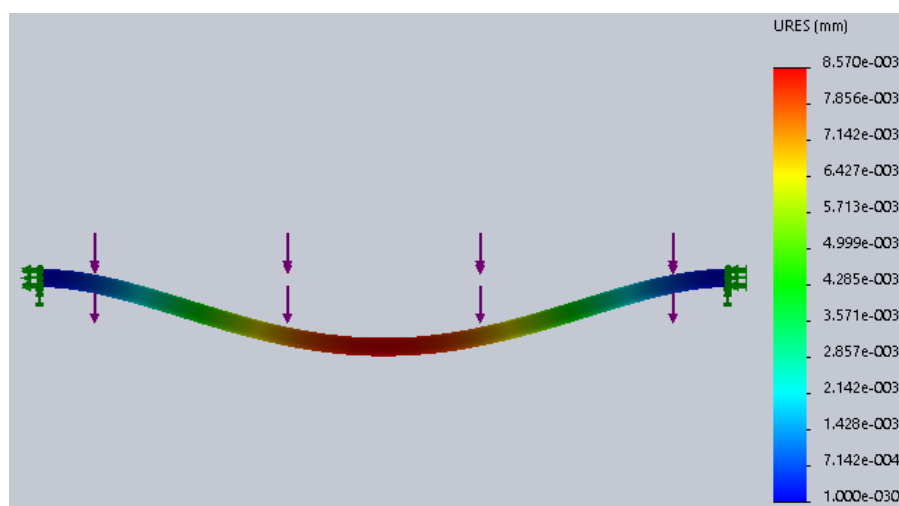


Figura 16. Análisis de carga sometido al tornillo sin fin

También se puede encontrar la polea GT2 que tiene 20 dientes lo cual permite un paso de 2 mm por diente. Para las dimensiones de grabación

requeridas y los componentes seleccionados se necesitan una banda de 600 mm de longitud.

Se utilizó la primera opción que puede soportar las cargas. Además fue necesario un eje de apoyo paralelo al tornillo sin fin para mantener el equilibrio de una base móvil. La polea necesitó de una viga que sirva como guía y el uso de rodillos para su movimiento por la longitud de la misma.

Para este diseño se necesitó un eje que brinde equilibrio a la base móvil de la Figura 15. En el mercado se tiene uno con una longitud que permite a la herramienta de grabado y la base móvil del eje Y moverse. En la Tabla 6 se muestran sus características.

Tabla 6. Características de eje acerado

Diámetro	8mm
Longitud	400mm
Material	Acero Plata DIN 1.2210 115CrV3
Peso	0.156Kg
Resistencia a la fluencia	560MPa

(FerroCortes, 2018)

Se lo analizó con el eje empotrado a sus extremos con una carga combinada del motor a pasos y la base de la Figura 15. La ecuación 2 muestra una carga distribuida total a la que será sometido el eje (Mott, 2006).

$$Q_t = \frac{q_a + q_b}{L} \quad [2]$$

Dónde:

- Q_t es la carga distribuida total.
- q_a es la carga del motor y base móvil
- q_b es el peso del eje.
- L es la longitud del eje.

En la Tabla 7 se muestran los valores usados para calcular la carga total.

Tabla 7. Valores cálculo de carga total

q_a	3.3418N
q_b	1.5288N
L	0.4m

Se obtuvo como resultado 12.1765N/m. Se simuló el eje con la carga obtenida. En la Figura 17 se observó que el momento máximo se encuentra en los extremos del mismo.

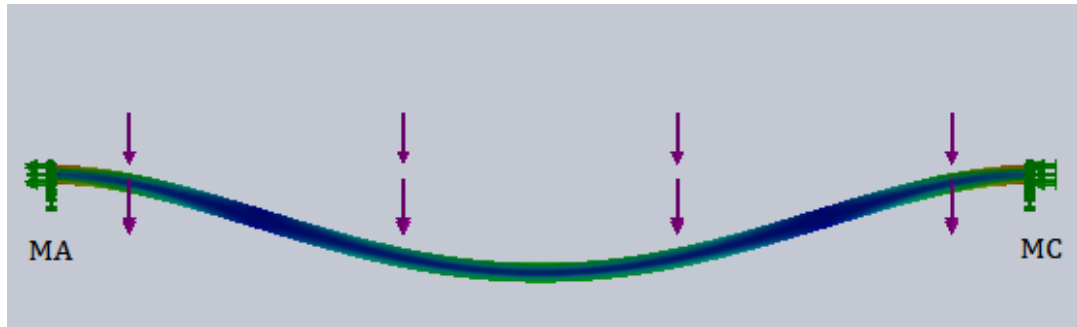


Figura 17. Simulación del eje

Se usa la ecuación 3 para el cálculo de momentos máximos (Mott, 2006).

$$M_A = M_B = \frac{Qt^*L^*L}{12} \quad [3]$$

Dónde:

- M_A es el momento máximo en A.
- M_B es el momento máximo en B.

El resultado del momento máximo es igual a 0.1623N*m.

Para comprobar que el eje propuesto cumple con los parámetros se utilizó el módulo de sección de la ecuación 4, un factor de seguridad de 2.5 para cargas dinámicas y se aplicó la ecuación 5 (Mott, 2006).

$$S = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad [4]$$

$$\frac{M_A}{S} \leq \frac{S_y}{N} \quad [5]$$

Dónde:

- S es el módulo de sección para una barra circular.
- d es diámetro del eje.
- S_y es la resistencia a la fluencia del eje.
- N es el factor de seguridad

En la Tabla 8 se muestran los valores para comprobar la condición de diseño

Tabla 8. Valores para cálculo de condición de diseño

d	0,008m
S_y	560MPa
N	2,5

Como se muestra en la ecuación 6, la condición se cumplió, por este motivo se usó el eje propuesto para la estructura del prototipo.

$$3.2288 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \leq 224 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad [6]$$

El movimiento en Y tendrá dos motores que funcionarán al mismo tiempo para transportar a la herramienta de grabado y sistema de guía. El primero tendrá la mayor carga de todos los ejes porque este transporta el motor a pasos para el movimiento en X. El segundo solo moverá una base para poder cargar el tornillo sin fin y el eje acerado, como se muestra en la Figura 18.

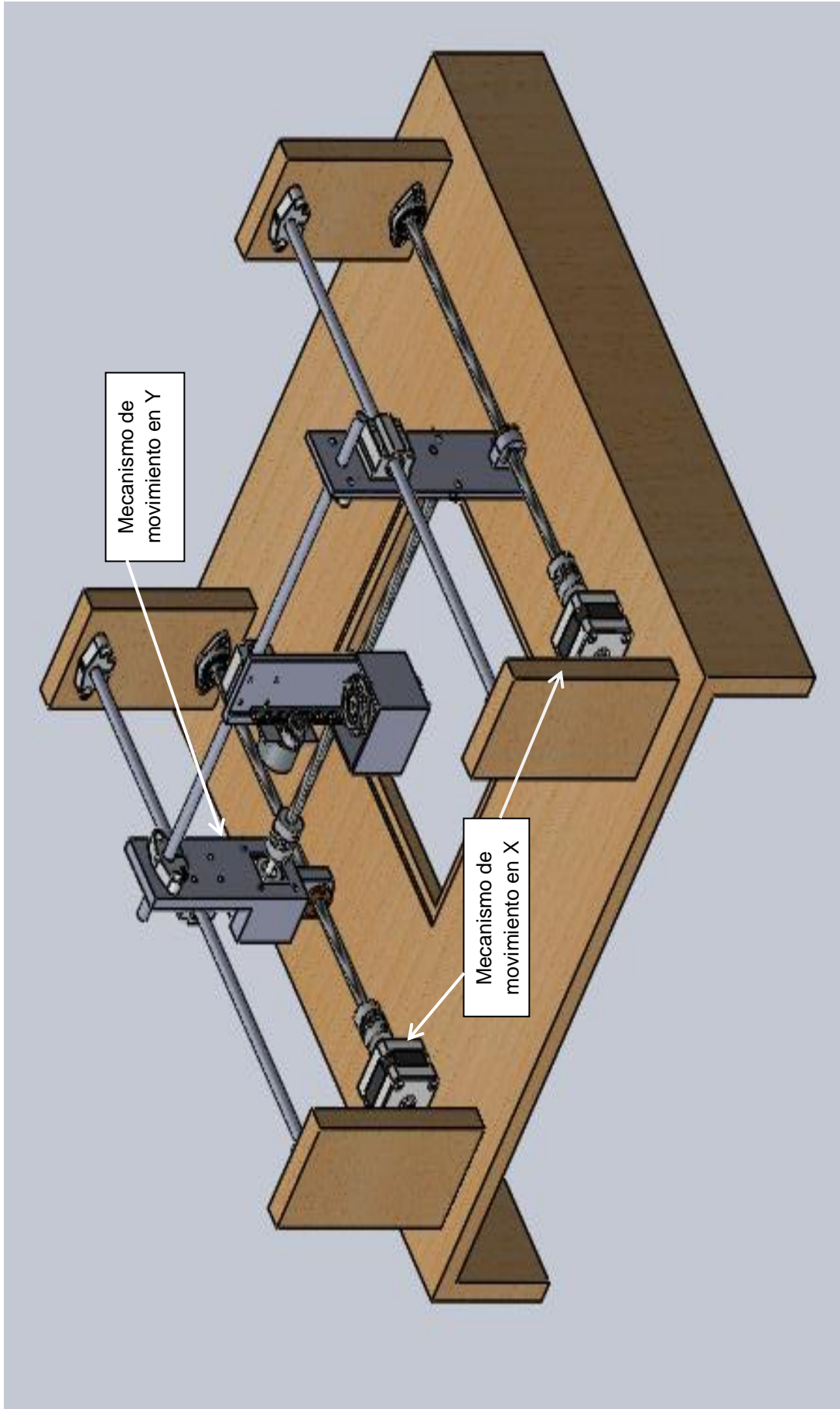




Figura 18. Estructura final de la máquina

2.3.2. Diseño electrónico

Para el control del proceso se necesitó un microcontrolador que pueda interpretar la información a fin de completar la trayectoria del dibujo a grabar. Para esto se consideraron las opciones de la Tabla 9.

Tabla 9. Comparación entre microcontroladores propuestos

		
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega2560
Alimentación	7 - 12 V	7 - 12 V
Disponibilidad en mercado	Si	Si
Compatibilidad con software libre	Si	Si
Número de pines	28	100
Salidas PWM	6	15

(Atmel, Microchip, 2016) (Atmel, Microchip, 2014)

Se usó un ATmega328P acoplado en la placa Arduino uno, al usarse 4 controladores para motor a pasos es necesario 4 pines digitales y 4 salidas de PWM. Además, se planteó el uso del CNC Shield de la Figura 19. Este permite el control de tres motores a pasos para el sistema de coordenadas; además, tiene la ventaja de controlar un cuarto que funcione como duplicado para uno de los ejes.





Figura 19. CNC Shield

(Santana, Blanco, Antúñez, Magadán, & Gómez, 2017)

El CNC Shield necesita de Drivers para motor a pasos, como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Drivers para CNC Shield

		
Driver	A4988	DRV8825
Alimentación máxima	35V	45V
Corriente máxima	2A	2.5A
Micro pasos	16	32
Disipador de calor	Si	Si
Disponibilidad en el mercado	Si	Si

(LLamas, 2016)

Para los motores seleccionados se usó el driver A4988 debido a la corriente que estos pueden soportar, el funcionamiento de los motores a pasos se encuentran dentro de este rango. Se calibró el voltaje de referencia del mismo, para esto se cuenta con la ecuación 7 (Armada, 2015).

$$I_{TRIPMAX} = \frac{V_{ref}}{8 * R_s} \quad [7]$$

Dónde:

- $I_{TRIPMAX}$ es la corriente máxima del motor a pasos.
- V_{ref} es el voltaje de referencia.
- R_s es la resistencia integrada al driver, para este caso 0.1ohms.

Despejando la ecuación 7 se tiene:

$$V_{ref} = I_{TRIPMAX} * 8 * R_s \quad [8]$$

Reemplazando los valores en la ecuación 6 se tiene un valor de 0.32 V, sin embargo, se utilizó el modo FULLSTEP del driver por lo que se multiplica el voltaje de referencia por 0.7, obteniendo finalmente 0.225 V. En la Figura 20 se muestra las gráficas de funcionamiento para los diferentes modos de paso.

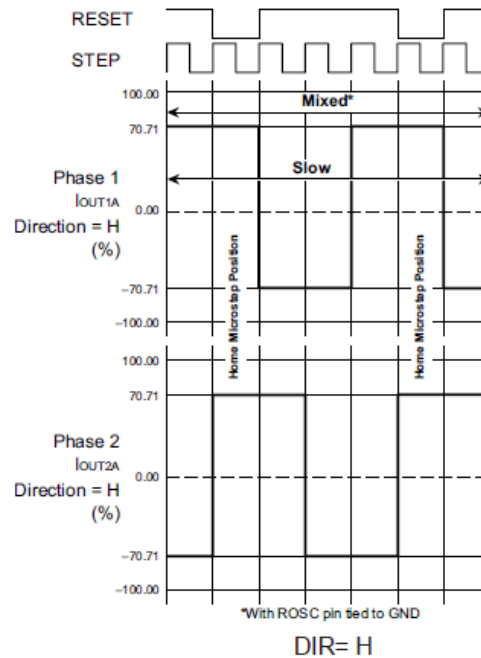


Figura 20. Gráfica de funcionamiento modo FULLSTEP
(Microsystems, 2018)

Se aplicó la misma ecuación para el motor de pasos de la Tabla 3 para el eje Z y se obtiene el valor de 0.03 V.

El Arduino Uno se conectó a la computadora alimentándolo con una tensión de 5V. El CNC Shield con los drivers se acoplaron a los pines de la placa. Para energizar los motores se usó una fuente de 12V y 2A. La corriente que esta proporciona es suficiente para mover a todos los actuadores mecánicos de la máquina. En la Figura 21 se presenta la conexión de los componentes antes mencionados en conjunto con los motores a paso.

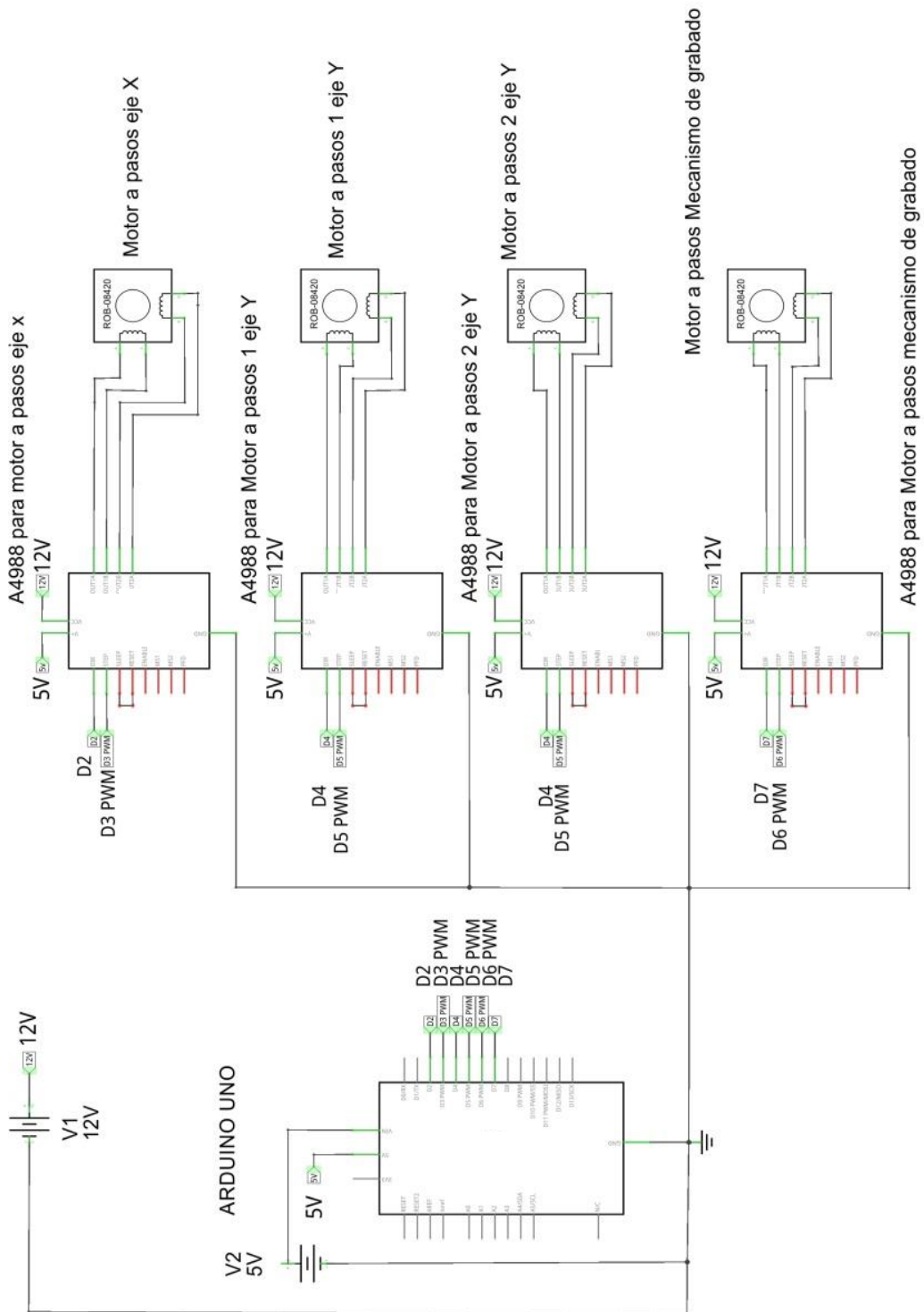


Figura 21. Esquema electrónico

2.3.3. Diseño del control

Para el control del dispositivo se usó el firmware libre GRBL cargado en la placa Arduino Uno; este recibe mediante comando serial las líneas de trayecto en código G y se encarga de mover los actuadores hacia los puntos establecidos.

El firmware se usa en conjunto del programa libre, Universal GCode Sender, que sirve como interfaz visual, también permite cargar el código G a la placa y configurar los motores a paso, de igual manera permite controlar la posición de los mismos a voluntad del usuario; esto resultó beneficioso ya que permitió establecer el origen de coordenadas de la máquina y guardarlo en la memoria EPROM del Arduino Uno.

En la Figura 22 se muestra el entorno grafico de Universal GCode Sender, en su pantalla principal se tienen las opciones de conexión por puerto serial con el microcontrolador, la posición actual de la máquina, una barra de texto para escribir comandos de movimiento en código G o para configurar los milímetros por vuelta que tendrán los motores a paso, y un cuadro para visualizar los comandos que se van a ejecutar en el firmware GRBL.

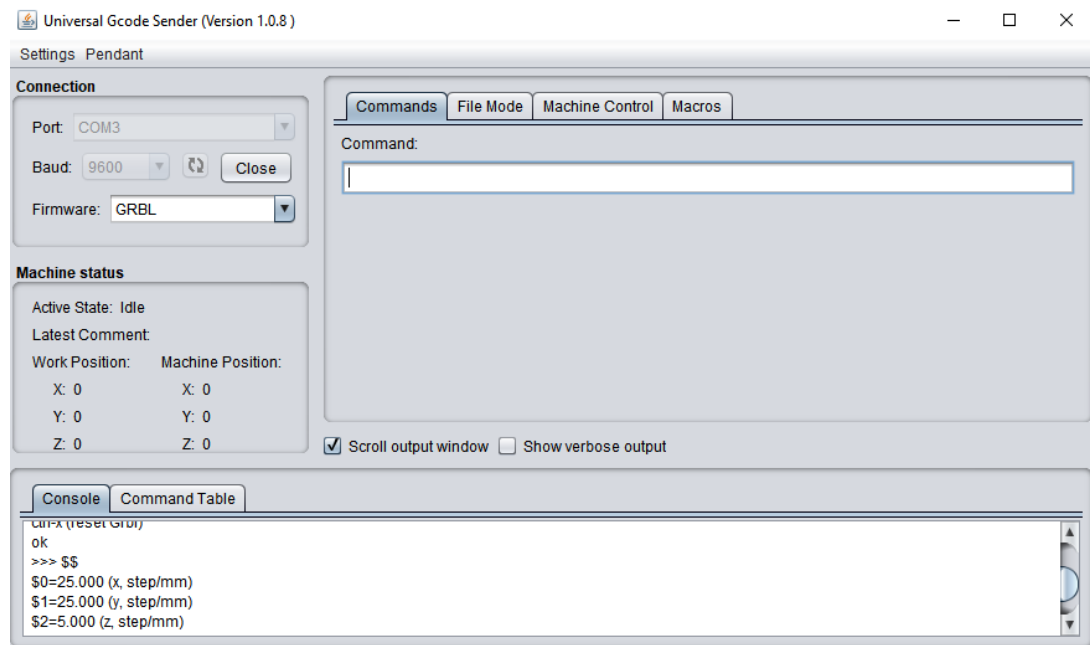


Figura 22. Pantalla de Inicio Universal Gcode Sender

También se tienen las opciones para ejecutar el código G, se puede ver la numero de líneas que tiene el mismo, el tiempo de duración de la operación, pausar o cancelar el proceso de grabado y visualizar la figura que se va a trazar; en la Figura 23 se observa lo antes mencionado.

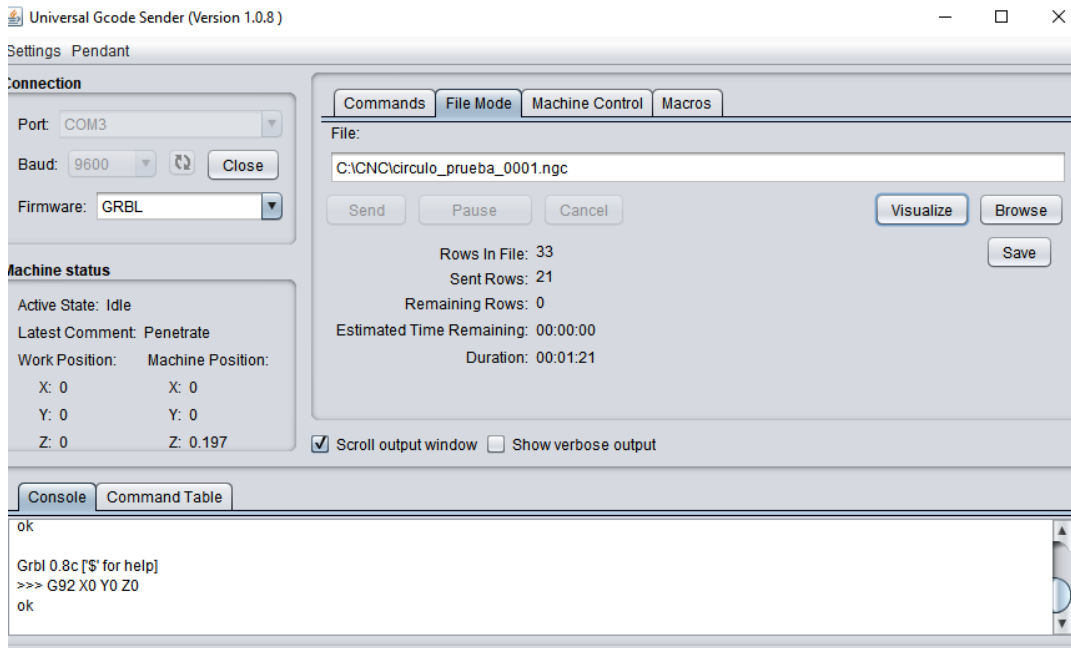


Figura 23. Ejecución del código G

Finalmente en la Figura 24 se tiene el control manual de los motores a paso en los ejes X, Y y Z; se puede seleccionar si el movimiento va a ser en milímetros o pulgadas, también se tiene la opción de setear el origen de coordenadas de la máquina

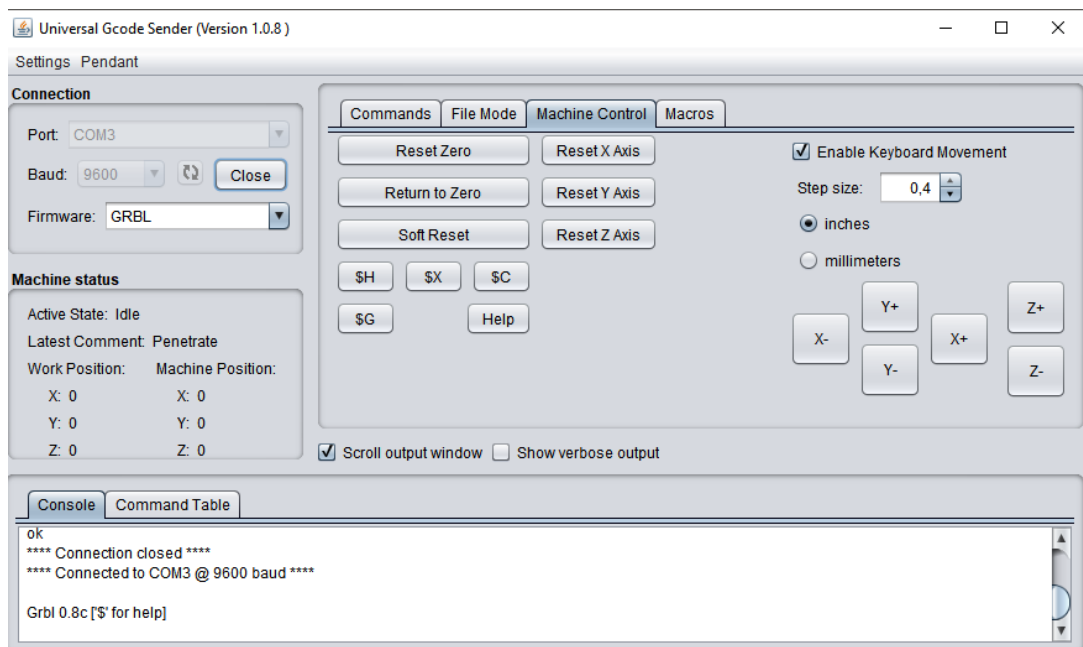


Figura 24. Control de motores a paso

Para el movimiento en los ejes X y Y, es necesario primero relacionar el número de pasos que realizará el motor, con la cantidad de milímetros que se mueva el tornillo sin fin en una vuelta.; según la características del motor seleccionado se tiene un ángulo por paso de 1.8° , lo que significa que en

360° se darán un total de 200 pasos; de igual manera, el tornillo sin fin va a moverse 8 milímetros al realizar una vuelta. Mediante la ecuación 9 se obtiene la relación entre el motor a pasos y el tornillo sin fin.

$$\frac{200 \text{ pasos}}{8 \text{ mm}} = 25 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}} \quad [9]$$

Al tener al motor configurado en modo FULL STEP, como se mencionó anteriormente, en un solo paso se va a recorrer 0.04mm, tanto para el eje X como el Y.

Se realiza una comparación similar para el movimiento en el eje Z, relacionando el número de dientes de la polea de la Figura 12 y el avance por diente de la cremallera plástica escogida, teniendo que en una vuelta de la polea el conjunto se moverá 40mm. Aplicando nuevamente la ecuación 9 se tiene que para el eje Z el motor de la Tabla 3, en 1mm se dará 5 pasos; lo que quiere decir que en un paso el motor se moverá 0.2mm.

En la Figura 25 se muestra el proceso para la programación de la Placa Arduino Uno en base a lo mencionado anteriormente.

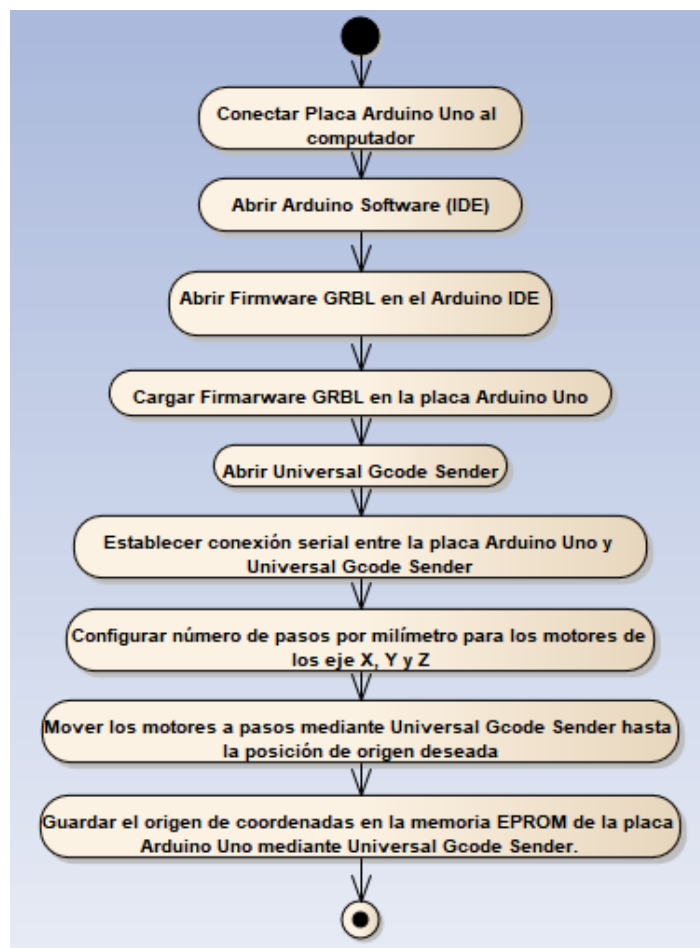


Figura 25. Diagrama de flujo configuración Arduino Uno

Se usó software libre para convertir imágenes a código G, para esto se tiene el programa Inkscape versión 0.91, este permite importar imágenes y figuras en formato jpeg, png, dxf, svg, pdf, entre otros más, además vectoriza las imágenes para obtener los puntos de las trayectorias, y después los convierte en código G para cargarlos en el microcontrolador. También se pueden realizar formas geométricas o insertar texto con diferentes tipos de fuente. A diferencia de DXF 2 G-CODE que solo permite importar archivos de formato dxf, sin embargo, se puede modificar el código G que se obtuvo. Debido al mayor número de formatos que permite importar y a su facilidad de uso se escogió utilizar Inkscape; en la Figura 26 se muestra el proceso de obtención del código G a partir de una imagen en formato digital.

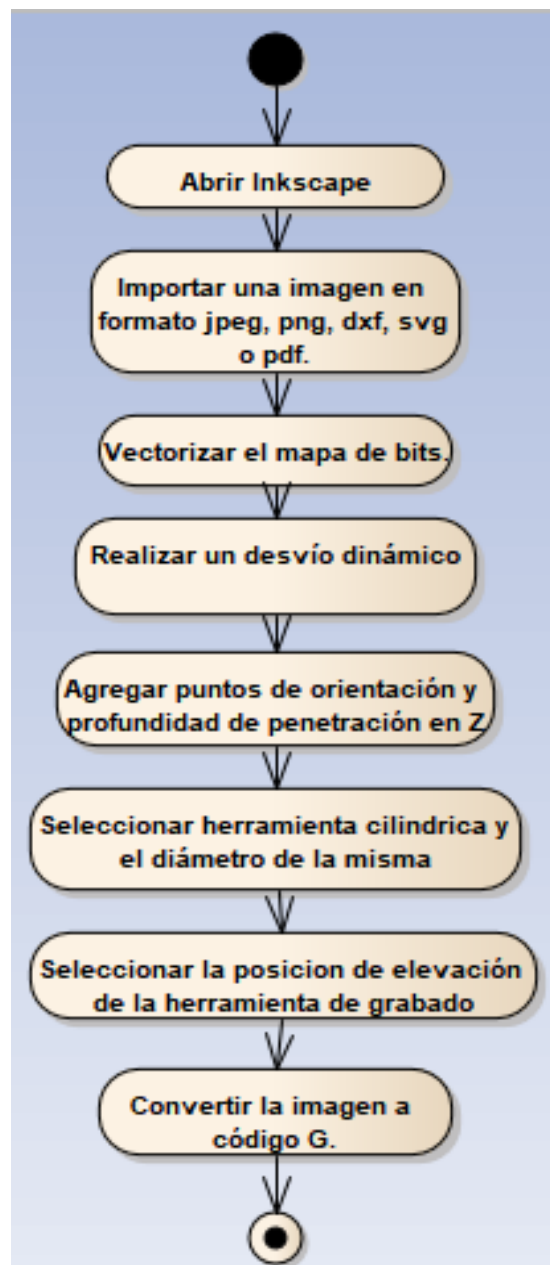


Figura 26. Diagrama de flujo para convertir una imagen digital a código G

En la Figura 27 se tiene el primer paso que es seleccionar una imagen, en este caso formato jpeg, para importarla a Inkscape.

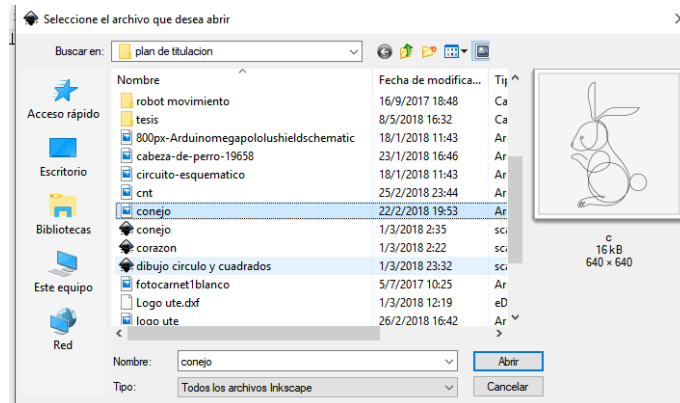


Figura 27. Selección de imagen en Inkscape

Después en la Figura 28 se da click en la opción detección de bordes para obtener solo el contorno de la imagen.

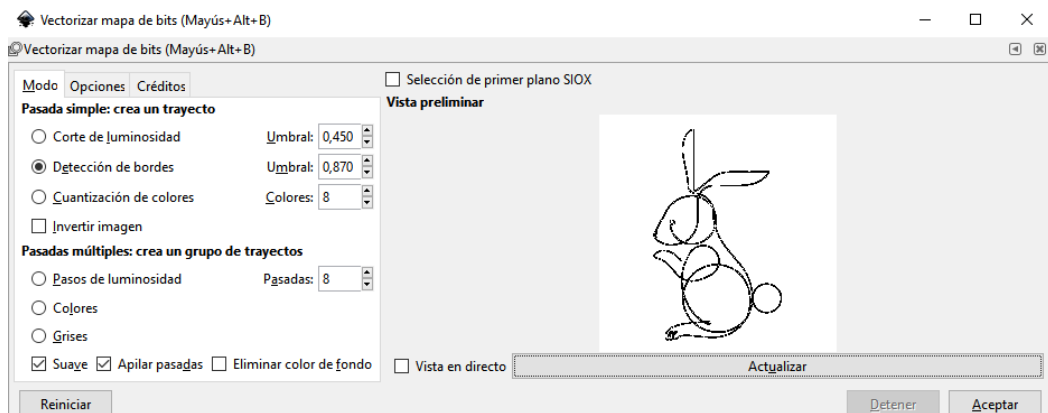


Figura 28. Detección de bordes de la imagen

Como se muestra en la Figura 29, en la pestaña trayecto se escoge la opción para crear el desvío dinámico.

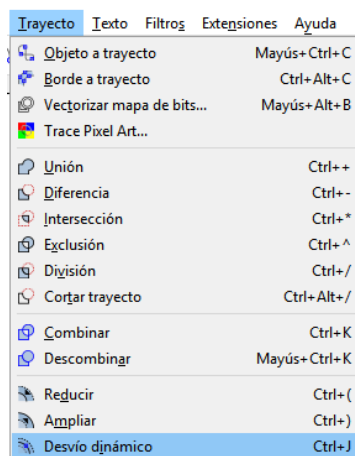


Figura 29. Selección de desvío dinámico

En la pestaña extensiones se escoge la opción GcodeTools y se agregan los puntos de orientación; también se define la penetración que tendrá la máquina, como se observa en la Figura 30.

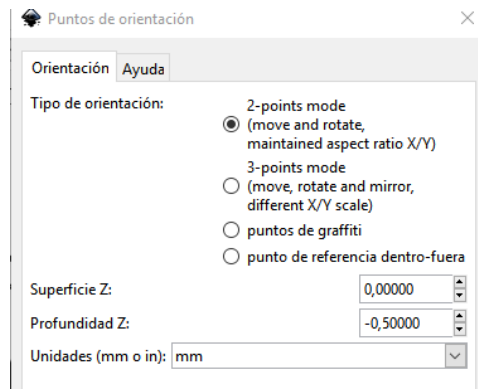


Figura 30. Puntos de Orientación

Nuevamente en la opción GcodeTools, se selecciona la opción biblioteca de herramientas, como se ve en la Figura 31, se escoge una de forma cilíndrica de 2mm de diámetro, igual a la fresa de la Figura 10.

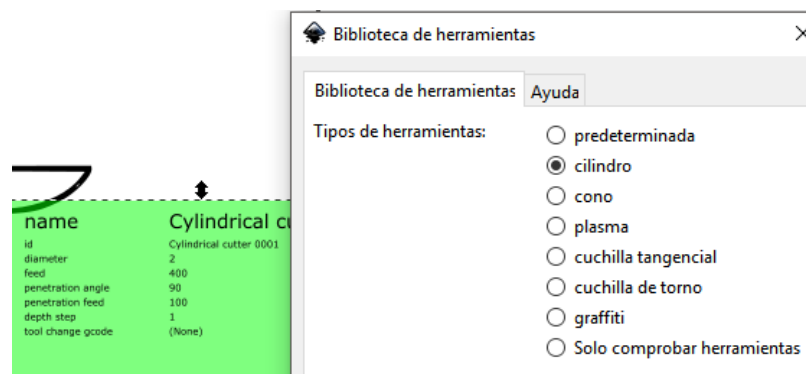


Figura 31. Selección de herramienta para grabado

Finalmente en la Figura 32, se tiene en GcodeTools, la opción trayecto a Gcode; se nombra al archivo, se selecciona la elevación segura que tendrá el código G. y se dimensiona el trayecto.

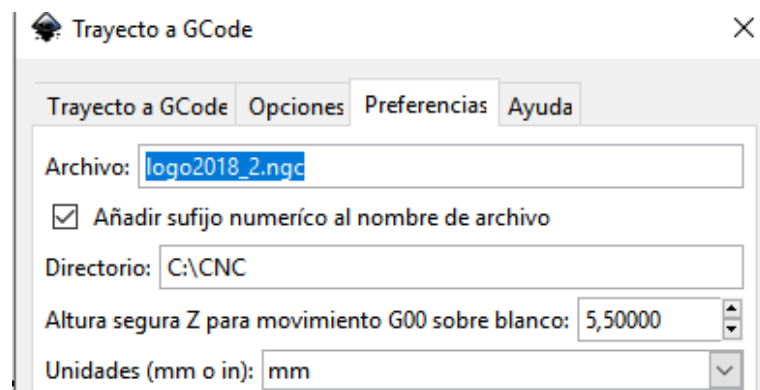


Figura 32. Trayecto a código G

Para verificar que los pasos por milímetro calculados anteriormente para el desplazamiento de los ejes se encuentren correctos se utilizó la cuadrícula de la Figura 33, con una dimensión de 19x19cm y cuadrados de 1x1cm; esta fue ubicada bajo el área de trabajo de la máquina que dibuja en vidrio.

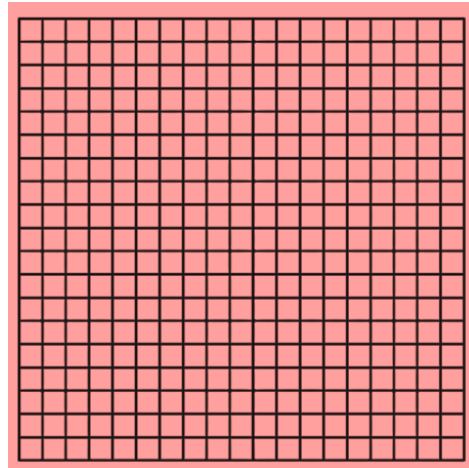


Figura 33. Cuadrícula para comprobación

Como se observa en la Figura 34, se posicionó la herramienta de grabado en uno de los extremos de la cuadrícula y se estableció el origen de coordenadas, después mediante la opción de desplazamiento que tiene Universal Gcode Sender, mostrado en la Figura 24, se definió que la punta se mueva un centímetro y manualmente se escogió la dirección en la que la máquina se desplazaría.

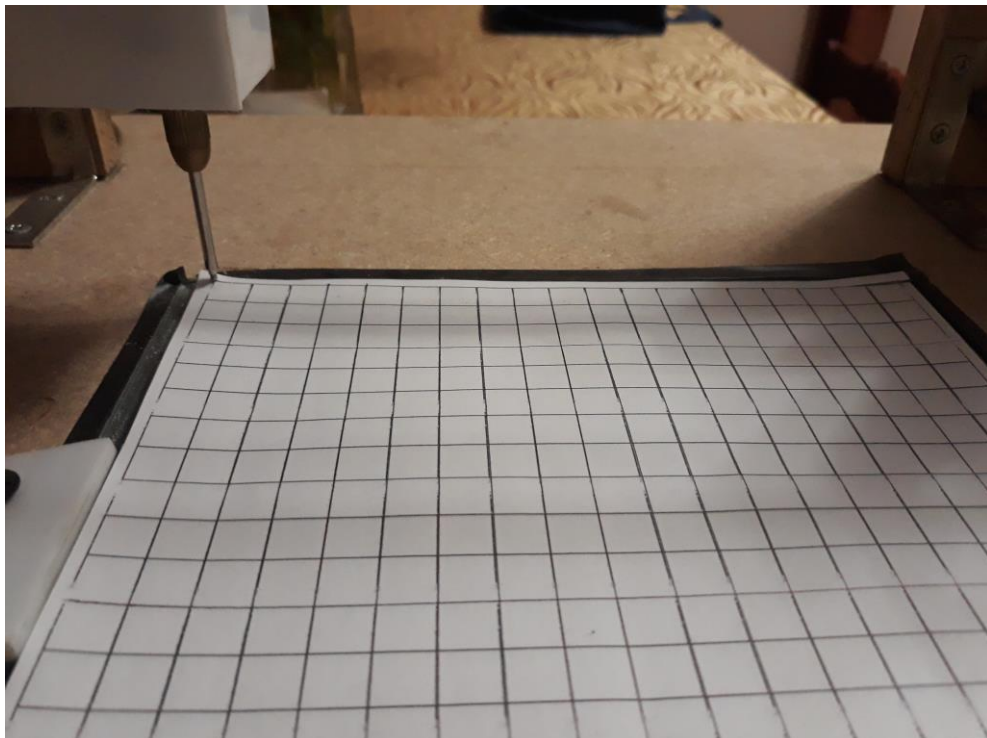


Figura 34. Posicionamiento herramienta de grabado

En la Figura 35 se tiene la herramienta de grabado en una de las intersecciones de la cuadrícula, para llegar hasta ese punto primero pasó por todos lo demás, desplazándose un centímetro a la vez en el plano XY. En cada intersección la punta se detenía, comprobando que el paso por milímetro configurado para los motores es el correcto,

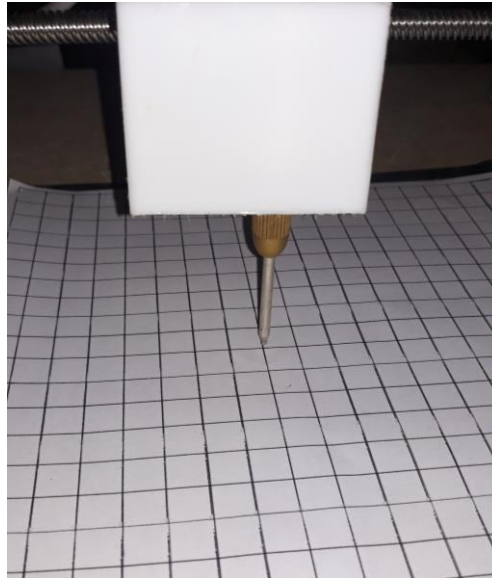


Figura 35. Comprobación de pasos por milímetro

2.4 Implementación del sistema

Una vez seleccionado los componentes mecánicos se ensambló los mecanismos de movimiento para los ejes.

Como se mencionó anteriormente para el movimiento en Y se usaran dos motores a paso que trabajan simultáneamente para poder mover el mecanismo de movimiento en X y la herramienta de grabado. Se tienen los siguientes componentes:

- Dos tornillos sin fin de 300mm de largo y 8mm de diámetro.
- Dos ejes acerados de 400mm de largo y 8mm de diámetro.
- Dos motores a pasos Nema 17 de 12V y corriente máxima de 0.4A
- Base móvil que soporta motor para movimiento en X.
- Base móvil que soporta el tornillo sin fin y eje acerado para movimiento en X.

El sistema de movimiento en X es similar al del eje Y, se conformó de la siguiente manera:

- Tornillo sin fin de 300mm de largo y 8mm de diámetro.
- Eje acerado de 400mm de largo y 8mm de diámetro.

- Motor a pasos Nema 17 de 12V y corriente máxima de 0.4A.
- Mecanismo de grabado.

El eje Z se encarga de la operación de grabado, subirá y bajará la herramienta a una altura de trabajo que se establecerá al momento de convertir la imagen en código G. Este mecanismo está compuesto de los siguientes elementos:

- Motor a pasos 28BYJ-48 de 5V y corriente máxima de 0.55mA.
- Polea GT2 con 20 dientes y un paso de 2mm por diente.
- Cremallera plástica con dientes de 2mm.
- Motor DC de 12V y corriente máxima de 1A.
- Acople para motor con punta de grabado para vidrio.
- Muela de diamante punta redonda de diámetro 2mm

El costo total de la máquina fue de \$428.07, utilizando únicamente materiales que se encuentren en el mercado nacional; se cumplió el requisito del presupuesto máximo para la elaboración del proyecto.

Se usó el software libre Inkscape versión 0.91 para poder convertir las imágenes digitales en código G, mismo que es subido en Universal Gcode Sender.

Se conectó la placa Arduino Uno a la computadora para que reciba la información de Universal Gcode Sender y mover los actuadores cumpliendo con las trayectorias del dibujo a grabar. Se acopló a la placa el CNC Shield con los 4 drivers para controlar los 4 motores a pasos que se usarán para el movimiento en el sistema de coordenadas. Se conectó el Shield a una fuente de 12 V.

En la Figura 36 se muestra los mecanismos de movimiento en el eje X y Y.

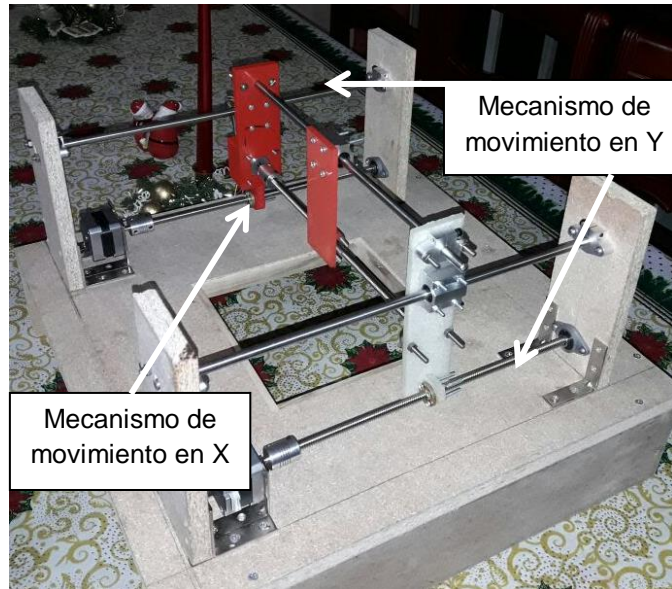


Figura 36. Mecanismos de movimiento para el sistema de coordenadas

Finalmente, en la Figura 37 se observa la máquina con el mecanismo de grabado incluido. En el Anexo 1 se tienen los planos con los elementos más importantes de la máquina.



Figura 37. Máquina con mecanismo de grabado

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar el funcionamiento del prototipo se realizaron pruebas de grabado con figuras geométricas simples, tomando en cuenta los puntos obtenidos del trayecto en código G, y los puntos reales obtenidos por la relación de milímetros por paso de los motores. Para esto se aplicó el error cuadrático medio de la raíz, como se muestra en la ecuación 10; este describe que entre más pequeño sea el resultado, más aproximado es el valor obtenido al deseado (Galindo, 2010).

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_D - V_O)^2}{n}} \quad [10]$$

Dónde:

- RMSD es el error cuadrático medio de la raíz.
- V_D es el valor deseado.
- V_O es el valor obtenido.
- n es el número de puntos obtenidos.

La primera prueba se la realizó grabando en vidrio un cuadrado de 40x40mm, como se observa en la Figura 38.

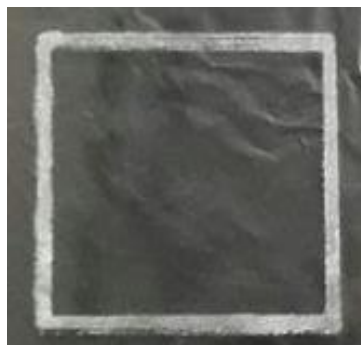


Figura 38. Prueba de Grabado de un Cuadrado

En la Tabla 11 se muestran los puntos de trayectoria del código G y los obtenidos por los motores a paso; también se tiene el cuadrado de la resta para los puntos en X y Y.

Tabla 11. Valores obtenidos prueba de grabado de un cuadrado

Cuadrado Código G(VD)		Cuadrado Grabado(VO)		(VD-VO)^2	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	En X	En Y
6.023129	43.976755	6.00	43.96	0.00053495	0.00028073
6.023129	6.023386	6.00	6.00	0.00053495	0.000546905
43.976508	6.023386	43.96	6.00	0.00027251	0.000546905
43.976508	43.976755	43.96	43.96	0.00027251	0.00028073
6.023129	43.976755	6.00	43.96	0.00053495	0.00028073
6.023129	43.976755	6.00	43.96	0.00053495	0.00028073

Aplicando la ecuación 10, se tiene un valor de 0.021153529mm en el desplazamiento en X y de 0.019221213mm en Y. Ambos valores resultan muy pequeños para los dos ejes, lo que quiere decir que el desplazamiento de los motores va a cumplir con los puntos de trayectoria con un error mínimo para una figura geométrica con líneas rectas. En la Figura 39 se muestra lo antes mencionado, superponiendo el trayecto real realizado por el dispositivo, frente al código G para grabar el cuadrado.

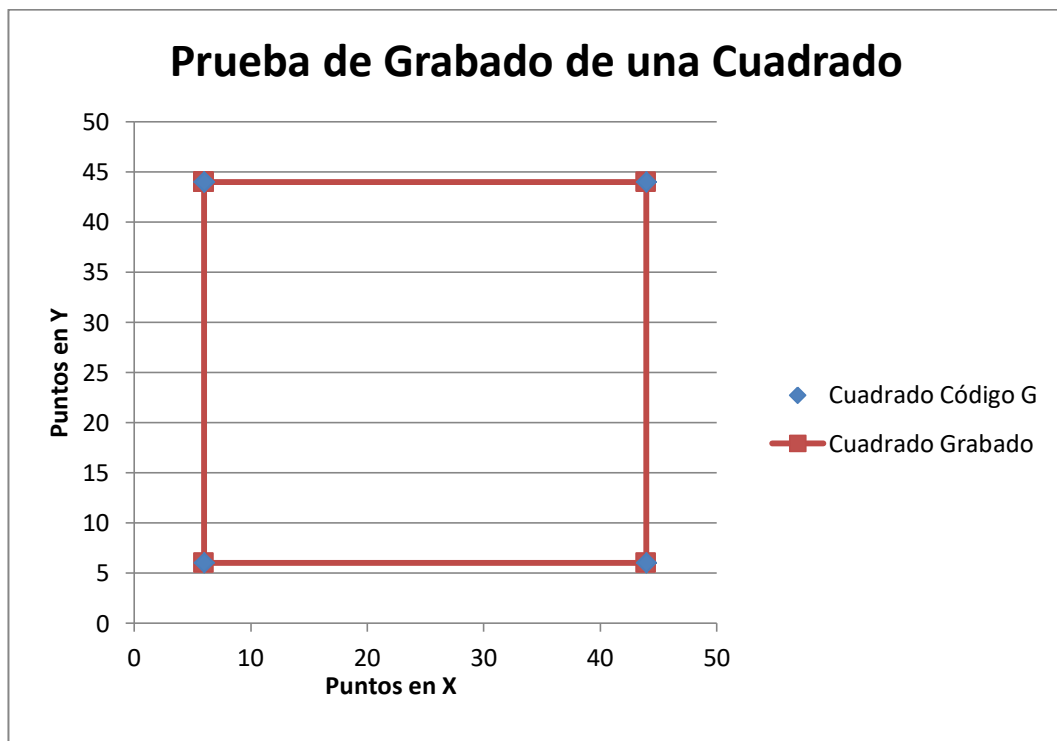


Figura 39. Gráfica de comparación grabado de un cuadrado

Para la segunda prueba se trazó un círculo de 32mm de diámetro, como se observa en la Figura 40.



Figura 40. Prueba de Grabado de un Círculo

Se realiza la misma comparación que se utilizó en la prueba del cuadrado, obteniendo la Tabla 12.

Tabla 12. Valores obtenidos prueba de grabado de un círculo

Círculo Código G(VD)		Círculo Grabado(VO)		(VD-VO) ²	
X(mm)	Y(mm)	X(mm)	Y(mm)	En X(mm)	En Y(mm)
19.056063	33.269950	19.04	33.24	0.00025802	0.000897
15.532075	32.840979	15.52	32.84	0.000145806	9.5844E-07
12.223199	31.552362	12.2	31.52	0.000538194	0.0010473
5.354903	23.091085	5.32	23.08	0.001218219	0.00012288
6.472370	12.242181	6.44	12.24	0.001047817	4.7568E-06
14.921733	5.360071	14.92	5.36	3.00329E-06	5.041E-09
25.754431	6.467661	25.72	6.44	0.001185494	0.00076513
32.637891	14.916496	32.6	14.88	0.001435728	0.00133196
31.539987	25.767357	31.52	25.76	0.00039948	5.4125E-05
31.515744	25.811454	31.48	25.8	0.001277634	0.00013119
26.305136	31.250675	26.28	31.24	0.000631818	0.00011396
19.056063	33.269950	19.04	33.24	0.00025802	0.000897

Nuevamente al aplicar la ecuación 10 se obtuvo los valores 0.026456305mm y 0.021146839mm, para los ejes X y Y respectivamente; demostrando que los puntos para una figura geométrica que no tiene líneas rectas son muy aproximados a los que se quieren grabar con el código G. También se utilizó una gráfica de dispersión para los datos obtenidos del círculo, como se observa en la Figura 41, y se evidencia que los puntos reales de grabado coinciden con los del trayecto en código G.

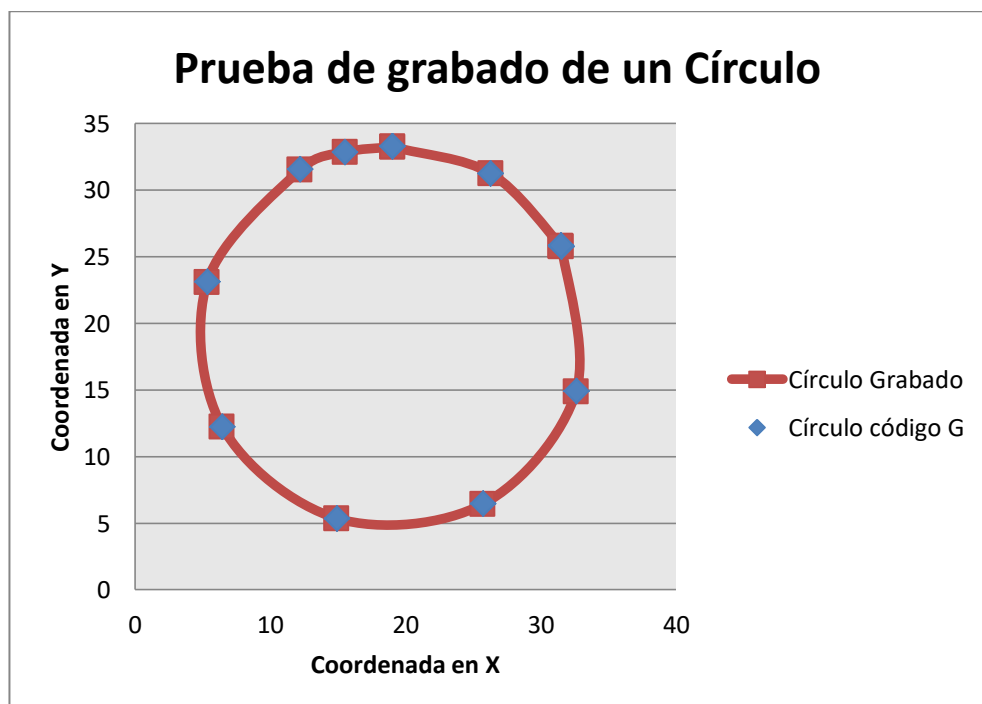


Figura 41. Gráfica de comparación grabado de un círculo

Como se puede observar los resultados del error en los ejes X y Y, para ambas pruebas, varían desde el 0.019mm hasta el 0.027mm, mismos que son bajos y demuestran que la máquina es capaz de cumplir con los puntos de trayectoria con un nivel de acierto aceptable. Se debe tomar en cuenta que al convertir una imagen a código G los puntos del trayecto tienen 6 decimales para dar la mayor precisión posible al trazado del dibujo, sin embargo, los motores están configurados para moverse en modo FULLSTEP y en cada paso se mueven 0.04mm, perdiendo así decimales que van a causar un error al momento de realizar el grabado.

Los valores más bajos de error se los tuvo en la prueba del grabado de un cuadrado, esto se debe a la menor cantidad de puntos que se tiene para realizar el trazado y, los motores solo se mueven en X o en Y, un sentido a la vez.

En la prueba de grabado del círculo se tiene un error más alto comparado con el cuadrado; para hacer esta figura la herramienta de grabado se mueve simultáneamente en los ejes X y Y, de igual manera, al convertir la imagen digital a código G, Inkscape genera automáticamente los puntos que representan el mejor trayecto para grabar la figura

En la Figura 40.y en la Figura 41, se puede observar como el trayecto grabado se aproxima a los puntos deseados por el código G, superponiéndose de tal manera que las figuras obtenidas son prácticamente las mismas que las imágenes digitales.

Finalmente para comprobar la funcionalidad de la máquina se grabó en una superficie de vidrio la imagen de un conejo, esta fue vectorizada y convertida a código G mediante Inkscape. Esta es una combinación de todo tipo de trayectos, se tienen líneas rectas, círculo, arcos y formas irregulares. De igual manera se puede ver los contornos y la diferencia de penetración que el dibujo tendrá en diferentes trayectos. En la Figura 42 se tiene la imagen digital comparada con el grabado en vidrio.



Figura 42. Comparación de imagen grabada en vidrio

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Gracias al prototipo de grabado en vidrio se reduce el tiempo para poder realizar la operación, además, personas que no tengan experiencia utilizando una grabadora de vidrio manual, pueden utilizar la máquina para trazar figuras, letras o dibujos específicos.
- No es necesario usar únicamente Inkscape para generar código G, se pueden usar otros programas; también se puede descargar de internet códigos ya existentes.
- La figura a grabar puede tener formato jpeg, png, dxf, svg, pdf, entre otros más, y no necesariamente ser monocromática porque el programa extrae los contornos de la imagen para después convertirlos a trayectos en código G
- El valor más alto de error fue al realizar la prueba de grabado del círculo, teniendo un valor de error de 0.026456305mm y 0.021146839mm, para los ejes X y Y respectivamente, debido al desplazamiento de los motores simultáneamente para poder trazar el contorno de la figura.
- Las líneas rectas al ser trayectos compuestos por un punto inicial y otro final, son las que tienen mayor precisión comparado con otro tipo de trazos con un error de 0.021153529mm en el desplazamiento en X y de 0.019221213mm en Y,
- Al realizar dibujos completos el tiempo de grabado dependerá del tamaño de la figura, el número de contornos que tenga y las trayectorias que se obtengan por parte del software.
- Si el vidrio no permanece fijo, debido a la vibración producida por la herramienta de grabado, en algunas partes de su superficie no se observará el trazado.

Recomendaciones

- Al estar trabajando sobre una superficie de vidrio se desprende viruta del mismo, es recomendable realizar esta actividad con mascarilla, gafas protectoras y guantes.
- Diseñar un mecanismo de grabado con un ángulo diferente a 90°, para poder usar fresas que sean no tengan la punta redonda, y dar otro tipo de acabado al resultado final.
- Antes de cada proceso de grabado comprobar que la herramienta de grabado se encuentre ubicada en el origen de coordenadas seleccionado.
- Mejorar el mecanismo de la herramienta de grabado.
- Utilizar una elevación de trabajo de al menos 5mm al momento de crear el código G, para asegurarse que mientras la herramienta se levante para trasladarse a otro punto, no grave accidentalmente el vidrio.

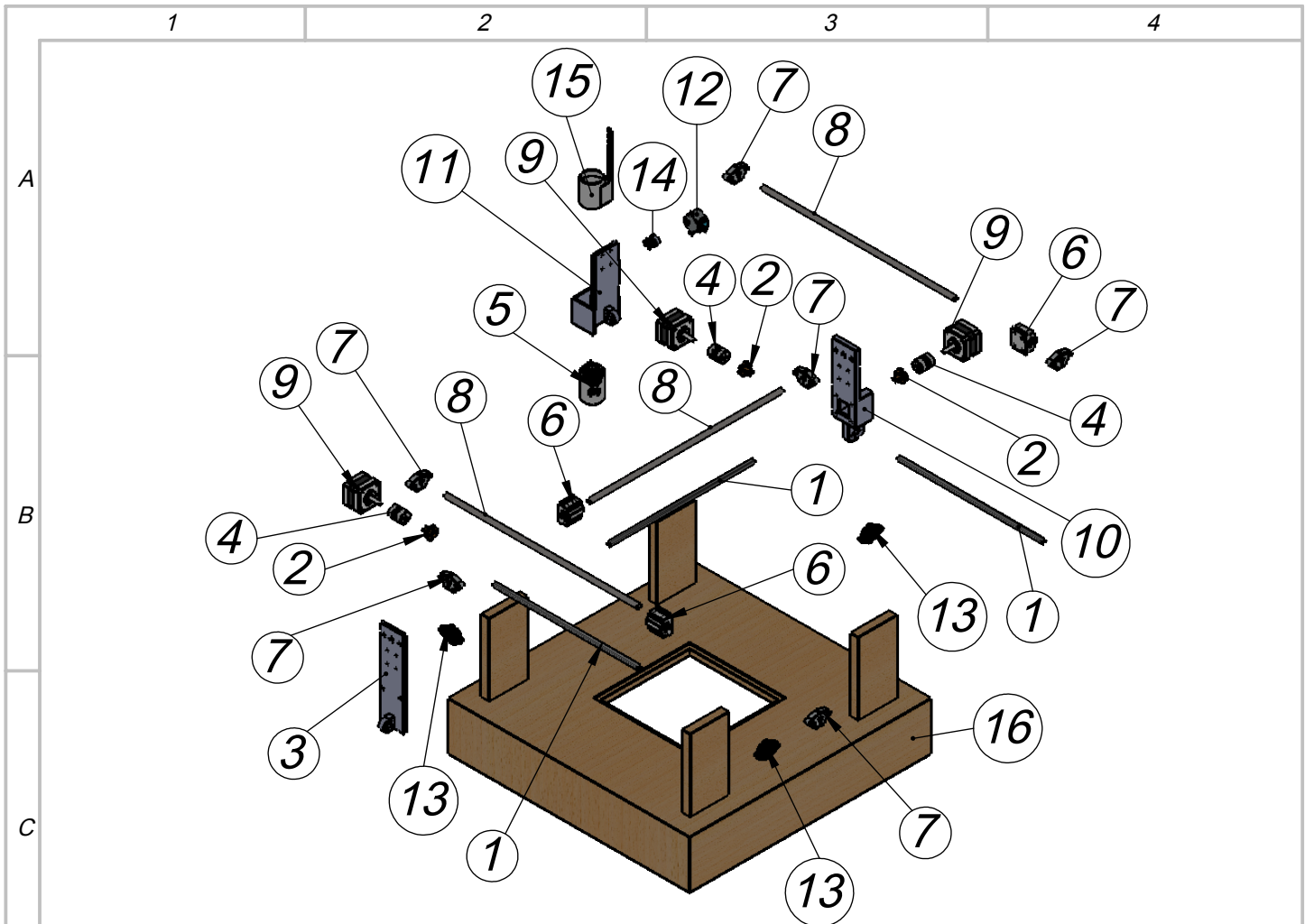
Bibliografía

- Armada, D. (2015). *Desarrollo de una impresora 3D open source. Propuesta e implementación de nuevas dimensiones y mejoras estructurales*. Ferrol: Universidade Da Coruña.
- ArteMecatrónica. (28 de Febrero de 2018). *Arte Mecatrónica*. Obtenido de Arte Mecatrónica: <https://www.artemecatronica.com/product/polea-dentada-pinion-gt2/>
- Atmel. (1 de Febrero de 2014). *Microchip*. Obtenido de Microchip: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- Atmel. (1 de Octubre de 2016). *Microchip*. Obtenido de Microchip: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf
- BangGood. (23 de Febrero de 2018). *BangGood*. Obtenido de BangGood: https://www.banggood.com/es/300mm-T8-Lead-Screw-with-Motor-Mounted-Ball-Bearing-and-Shaft-Coupling-p-1118181.html?cur_warehouse=CN
- Blanco, G. C., Gandara, J. F., Galicia, R. R., & Laguna, A. T. (2008). *Sistema de corte y grabado de vidrio*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional.
- BricoGeek. (23 de Febrero de 2018). *BricoGeek*. Obtenido de BricoGeek: <http://tienda.bricogeek.com/motores/75-motor-paso-a-paso-24kg-cm.html>
- DIYWorldDecor. (14 de mayo de 2018). *DIY World Decor*. Obtenido de DIY World Decor: <https://diyworlddecor.com/products/8pcs-0-5-3mm-micro-twist-drill-chuck-set-small-electric-drill-bit-collet-with-allen-wrench>
- DREMMELE. (28 de Febrero de 2018). *Dremmel*. Obtenido de Dremmel: <https://www.dremeleurope.com/es/es/dremel%C2%AE300series-390-ocs-p/>
- Farinango, M. D., & Yépez, E. A. (2007). Automatización de una máquina fresadora vertical o tupí. En M. D. Farinango, & E. A. Yépez, *Automatización de una máquina fresadora vertical o tupí* (pág. 2). Quito: Universidad Politecnica Nacional.
- FerroCortes. (26 de Febrero de 2018). *FerroCortes*. Obtenido de FerroCortes: <http://www.ferrocortes.com.co/acero-plata/>
- Galindo, E. (2010). *Estadística Métodos y Aplicación*. Quito: Prociencias Editores.
- García, M. R. (2014). *Diseño y fabricación de una fresadora CNC de 3 ejes para el mecanizado de PCB con plataformas de desarrollo abiertas*. Agosto: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Kalpakian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson.

- Kinmore. (14 de mayo de 2018). *Kinmore*. Obtenido de Kinmore: <http://www.kinmoremotor.com/dc-motor/rs-540-545a.html>
- LLamas, L. (23 de Agosto de 2016). *Luis Llamas*. Obtenido de Luis Llamas: <https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/>
- Marin, F. B. (2012). *Modulo control numerico computarizado*. Colombia: UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA CCAV NEIVA.
- Microsystems, A. (16 de agosto de 2018). *A4988 DATASHEET*. Allegro Microsystems: Allegro Microsystems. Obtenido de Allegro Microsystems.
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquina*. México: Pearson Educación.
- Pearson, C. (2010). *Manual del Vidrio Plano*. Argentina: Cámara del Vidrio Plano y sus Manufacturas de la República Argentina.
- Perez, J. G. (2009). *Manual de Operacion y Practicas Didacticas de Torno y Fresadora CNC en el Laboratorio LPAIC de ESIME AZCAPOTZALCO*. Mexico: Insituto Politecnico Nacional.
- Prometec. (28 de Febrero de 2018). *Prometec*. Obtenido de Prometec: <https://www.prometec.net/motor-28byj-48/>
- Santana, J., Blanco, A., Antúnez, E., Magadán, A., & Gómez, F. (2017). Control Numérico en una Máquina de Rehabilitación de Tobillos. *Pistas Educativas*, 592 - 610.
- Schey, J. (2000). *Procesos de Manufactura*. Mexico: Mc GrawHill.
- Serway, R., & Jewett, J. (2015). *Física para Ciencias e Ingeniería Volumen 1*. México D.F: Cengage Learning.
- Vallejo, D. (2007). Sistemas de grabado con láser. En D. Vallejo, *Sistemas de grabado con láser* (págs. 2-10). Mexico DF.: Instituto Politecnico Nacional.

5. ANEXOS

Anexo 1.
Planos de la máquina grabadora de vidrio en dos
dimensiones



Nº Pieza	DENOMINACIÓN	MATERIAL	Cant.	PESO [Kg]
1	Tornillo sin fin 8mm de diámetro 300mm de largo	Acero Inoxidable AISI 316	3	0,091
2	Tuerca tornillo sin fin 8mm de diámetro	Bronce	3	0,0204
3	Base móvil eje Y 1	PLA	1	0,097
4	Acople flexible	Aluminio	3	0,01
5	Motor DC 12V 1A	Acero Aleado	1	0,082
6	Rodamiento linear 8mm de diámetro	Aluminio	3	0,042
7	Soporte para eje 8mm de diámetro	Aluminio	6	0,02
8	Eje acerado	Acero Plata DIN 1,2210 115CrV3	3	0,156
9	Motor a pasos Nema 17	Acero Aleado	3	0,192
10	Base móvil eje Y 2	PLA	1	0,149
11	Base móvil eje X	PLA	1	0,121
12	Motor a pasos 28BYJ - 48	Acero Aleado	1	0,038
13	Chumacera KFL08	Aleación Zinc AC41A	3	0,016
14	Polea GT2 20 dientes	Aluminio	1	0,0056
15	Cremallera plástica 125.5mm de largo	Plástico	1	0,0021
16	Base	Madera Tropicalizada	1	4,47

				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:			
				± 0.1	5.47	Varios			
				Fecha	Nombre	Vista Explosionada		ESCALA:	
				Dibujado 7/5/2018	Arciniaga C.			1:10	
				Revisado					
				Aprobado					
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:			HOJA:	
				UTE	2			A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						

1

2

3

4

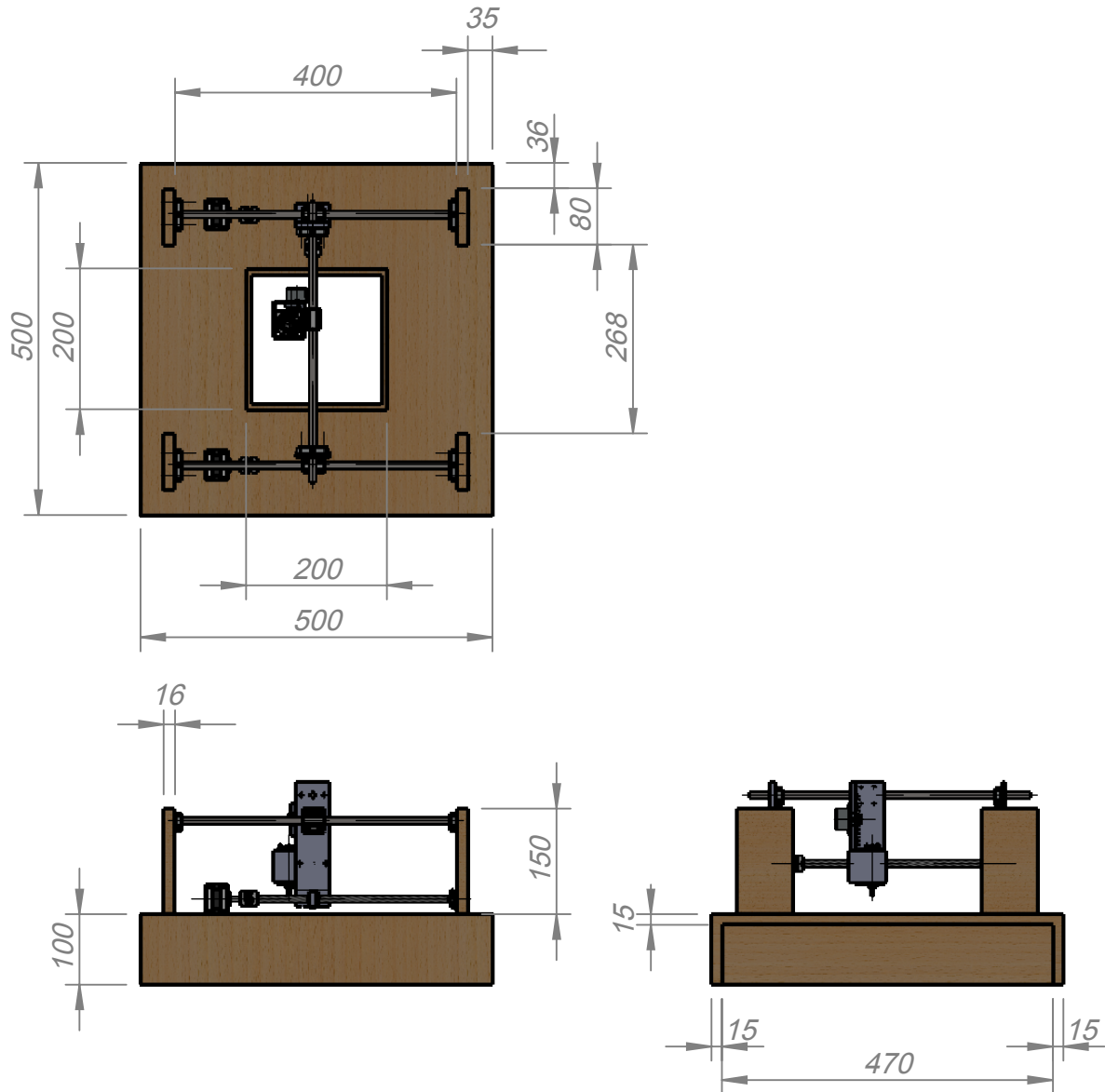
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	5,47	Varios	
				Fecha	Nombre	Vistas Principales	
				Dibujado 8/5/2018	Arciniega C		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	ESCALA:
				UTE 		3	1:10
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				
							A4

1

2

3

4

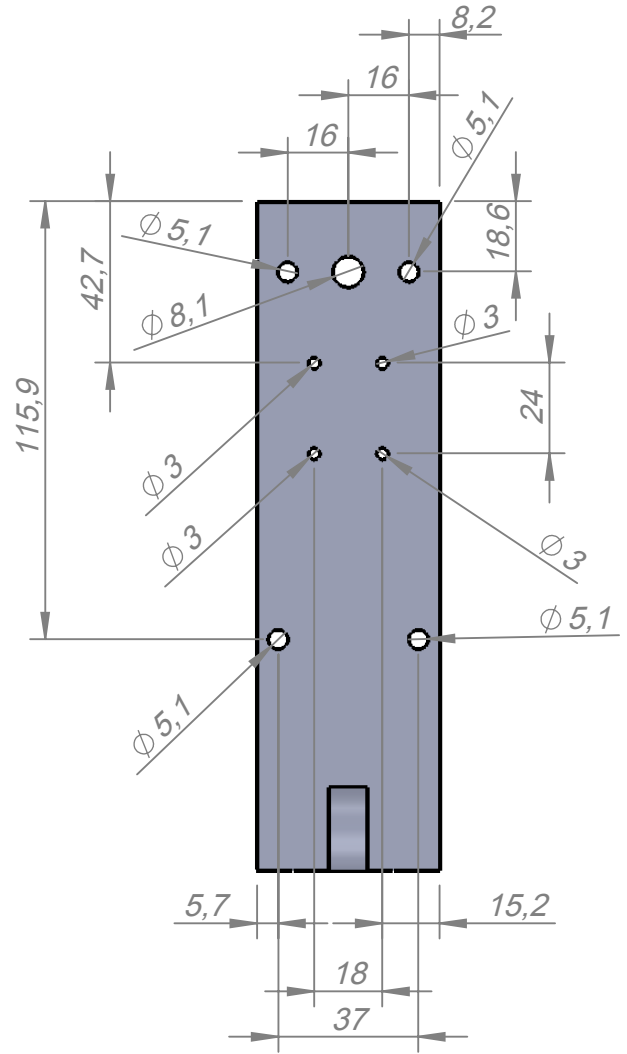
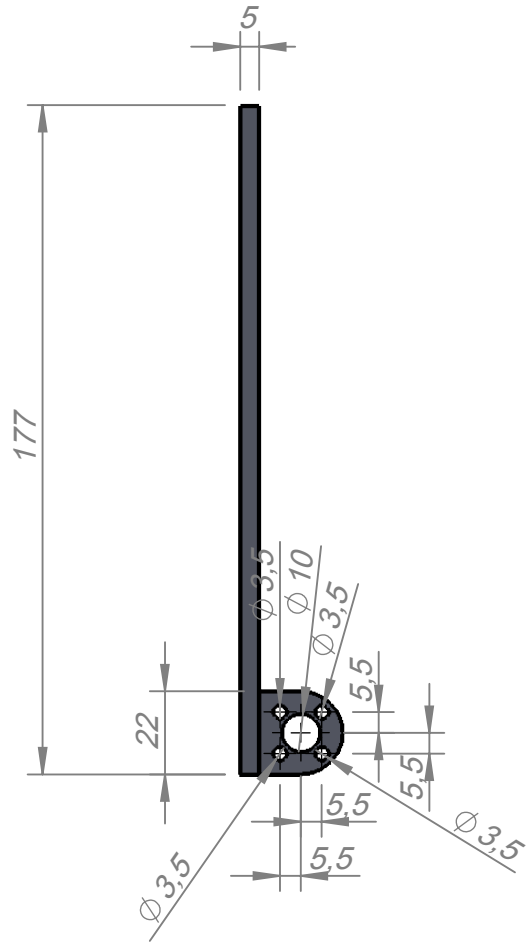
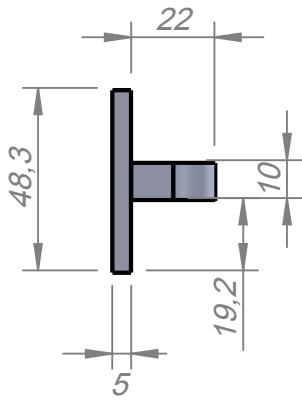
A


B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:			
				± 0.1	0,097	PLA			
				Fecha	Nombre	Base móvil eje Y 1		ESCALA:	
				Dibujado 8/5/2018	Arciniega C			1:2	
				Revisado					
				Aprobado					
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:			HOJA:	
				UTE 	4			A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						

1

2

3

4

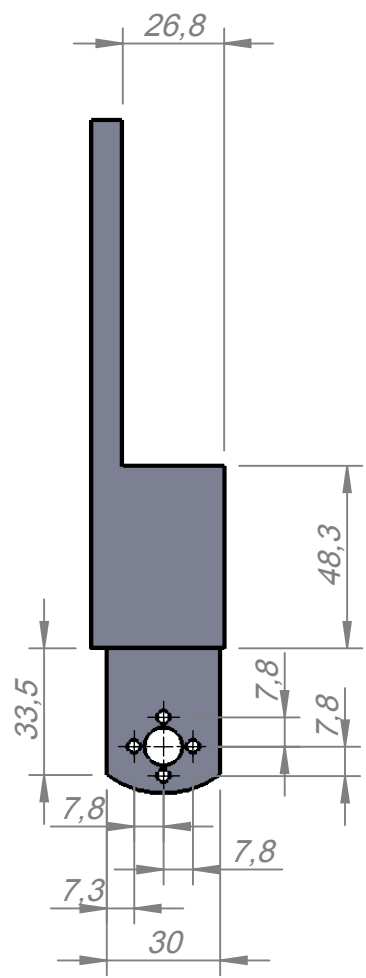
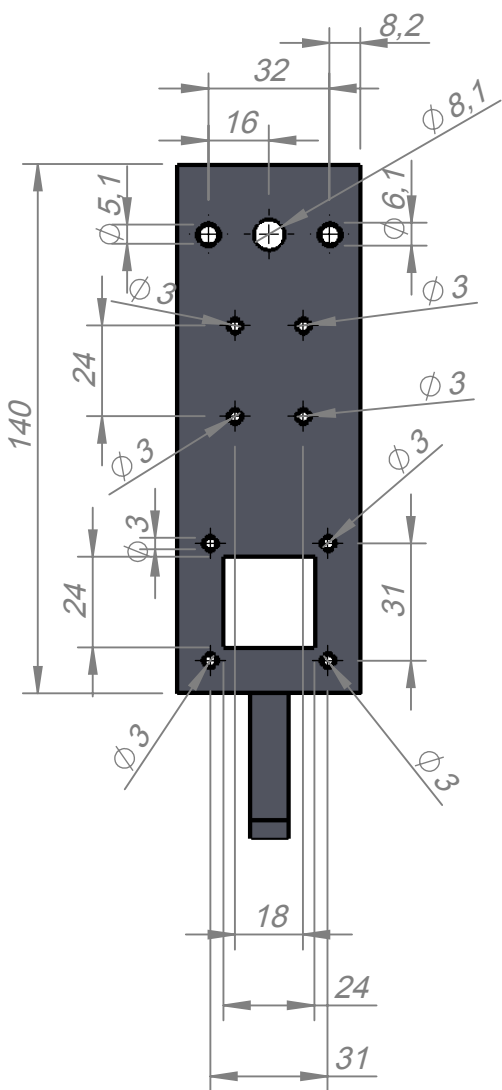
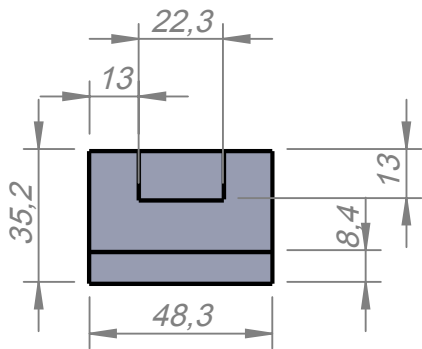
A


B

C

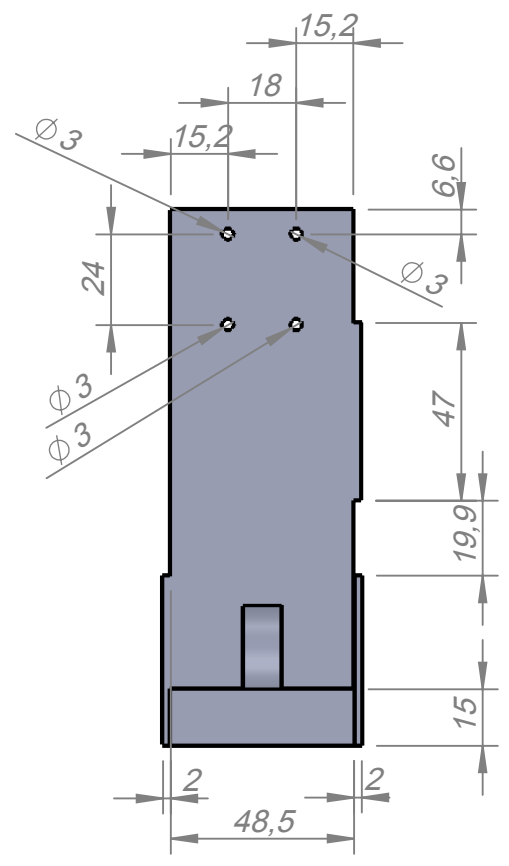
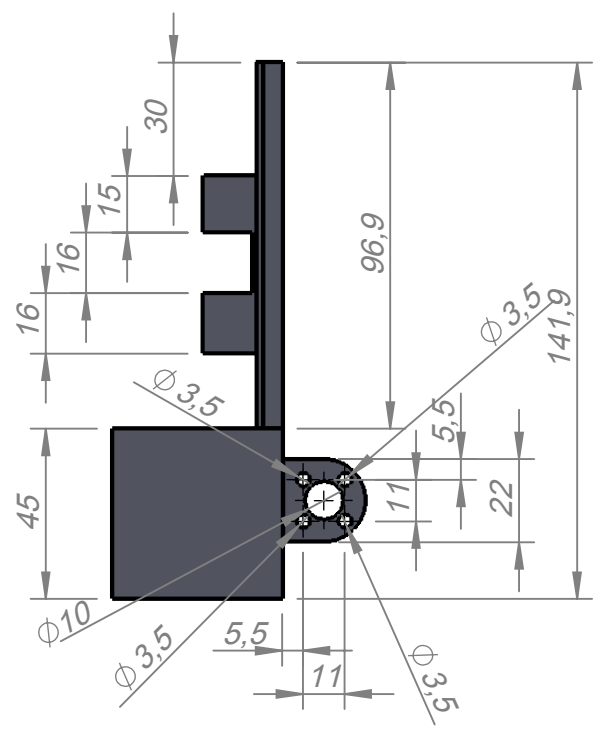
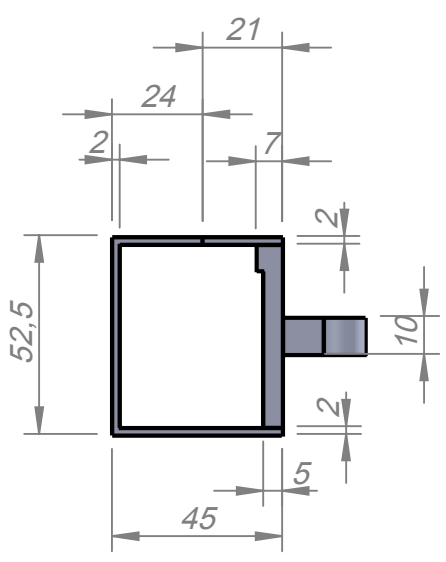
D


E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:		
				± 0.1	0,149	PLA		
				Fecha	Nombre	Base móvil eje Y 2		ESCALA:
				Dibujado 8/5/2018				1:2
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:	5	HOJA:	
				UTE 			A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					

A
B
C
D
E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.1	0,121	PLA	
				Fecha	Nombre	<i>Base móvil eje X</i>	
				Dibujado 8/5/2018	Arciniega C		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	ESCALA:
				UTE 		6	1:2
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				HOJA:
							A4