



Proyecto Final - Sensores y Actuadores

CNC para manufactura de PCB

Alejandro Ojeda Olarte - aojedao@unal.edu.co
Julian Felipe Luna Castro - juflunaca@unal.edu.co

CONTENIDO

I	Resumen Preliminar	3
I-A	Descripción	3
II	Características	3
II-A	Fuerzas en el proceso	4
III	Diseño por selección	4
III-A	Eje Z	4
III-B	Eje X	5
III-C	Eje Y	6
III-D	Componentes mecánicos	6
III-D1	Perfiles	6
III-E	Varillas lisas	6
III-E1	Husillo	6
III-F	Selección Rodamiento Lineales	7
III-G	Componentes electrónicos	7
III-G1	Motores	7
III-G2	Drivers y Control	8
III-G3	Alimentación	8
IV	Software	8
IV-A	GRBL	8
IV-B	Arduino	8
V	Diseño CAD	8
V-A	Piezas en PLA	8
	Referencias	9
	Referencias	

ÍNDICE DE FIGURAS

1	PCB recubierta de cobre	3
---	-------------------------	---



2	Diagrama de punto más crítico para GPM. [2]	3
3	Dremel 4000.	4
4	Corte transversal del área crítica en el soporte del Dremel	4
5	Diseño de la CNC en el software CAD Autodesk Inventor Professional, con sus ejes coordinados.	5
6	Diagrama de Fuerza cortante y momento flector para las varillas en las que se desplaza el soporte sobre el eje X, en el peor caso.	6
7	Diagrama de Fuerza cortante y momento flector para las varillas en las que se desplaza el soporte sobre el eje Y, en el peor caso.	6
8	Motores paso a paso NEMA 17: $5,6kg \cdot cm$ – $12VDC$ – $1,68A$	7
9	Arduino UNO con shield CNC V3 y 3 drivers de motor paso a paso.	8
10	Soporte del motor en Y.	8
11	Soporte de extremo contrario en Y	9
12	Soporte del eje X.	9
13	Soporte fijo del eje Z.	9
14	Soporte móvil del eje Z.	9

I. RESUMEN PRELIMINAR

I-A. Descripción

Las PCB (Printed Circuit Board) [1] son estructuras que sostienen mecánicamente y conecta eléctricamente componentes electrónicos, y generalmente para la fabricación de prototipos tecnológicos se hace uso de estas tarjetas. Con el objetivo de poder manufacturar tarjetas prototipo en baquelitas recubiertas de cobre:

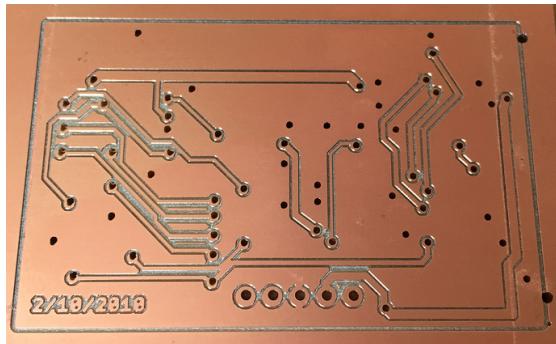


Figura 1: PCB recubierta de cobre.

Existe un amplio rango de métodos de manufactura de PCB, el que se escogió dado la flexibilidad para manufacturar más piezas por maquinado, y construir la máquina de manera que se cumpla los requisitos y reducir los costos.

Uno de los procesos de manufactura para estas placas corresponde a maquinado por una máquina que posee Computer Numeric Control (CNC) que remueve cobre de manera que se dejan los caminos conductores.

II. CARACTERÍSTICAS

Se diseñará una máquina para tener un área de trabajo de por lo menos $20\text{cm} \times 30\text{cm}$ que maquine baquelita, con proyección a poder maquinar materiales de baja dureza como la madera o aglomerados.

En este caso puntual se diseñara para maquinar baquelitas FR4, dónde FR4 es una norma definida

por la NEMA (National Electrical Manufacturers Association) para un compuesto de resina epoxídica reforzada de fibra de vidrio [3], usado frecuentemente en prototipado de circuitos electrónicos. A pesar que existe un estándar, se tomará como referencia a Khandpur [10], donde se asume que el espesor de cobre más común es de $35\mu\text{m}$.

El diseño se consideró dos opciones, el Gantry Part Moving Machine (GPM) [2] y Working Table Moving [2], donde GPM resulta la más conveniente puesto que se busca tener más área de trabajo y no se maquinara materiales duros como metales.

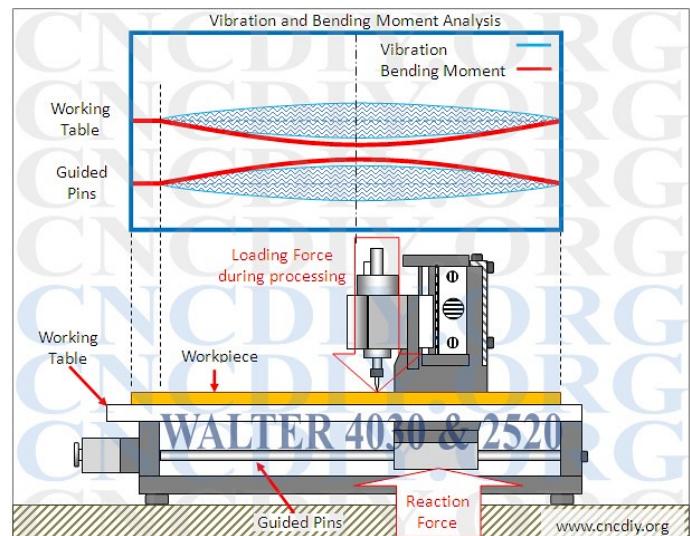


Figura 2: Diagrama de punto más crítico para GPM. [2]

En la imagen identificamos el punto crítico de trabajo en una máquina GPM.

El Dremel 4000, un motortool de 5000rpm a 35000rpm con un peso de $0,66\text{kg}$ y tiene 175W [4]. Este corresponderá a la herramienta para maquinado puesto que ya se tiene disposición de este.



Figura 3: Dremel 4000.

Como referencia, se tomó el proyecto de Nikodem Bartnik [5], cuyo diseño utiliza un dremel como herramienta principal y la estructura está apoyada con partes hechas en impresión 3D por deposición de material fundido. Se procede a usar el principio de la estructura referenciada para realizar un diseño por selección. Así mismo se usará el software GRBL para la programación del microcontrolador.

II-A. Fuerzas en el proceso

Considerando el uso de una broca con ángulo de ataque bajo, cuando se perfora una tarjeta se tendrá la mayor fuerza ejercida en el eje Z, que tomaremos como referencia el encontrado por Yang [6] con un taladro de características similares al utilizado en este proyecto, cuya fuerza es de 90N en el peor caso, la cual se ejerce en el sentido contrario del peso de las partes de la maquina.

III. DISEÑO POR SELECCIÓN

III-A. Eje Z

Inicialmente se comienza verificando el eje Z (para referencia, vease fig. 5), donde se soporta el Dremel, el motor paso a paso y la estructura de movimiento.

$$M_{dremel} = 0,7kg$$

$$M_{motor} = 0,39kg$$

$$M_{varillaslisas} = 0,09kg$$

$$M_{varillaroscada} = 0,1kg$$

$$M_{ejeZinicial} = 1,28kg$$

Asumiendo que la zona más angosta que soportara esa masa en la estructura que mueve el eje Z corresponderá a un área de $0,034m \cdot 0,07m$ con 3 hoyos donde pasan las varillas.

$$Acrit_{ejeZ} = (34 \cdot 70 - \pi \cdot (2 \cdot 7,5^2 + 5,2^2 + 4 \cdot 1,4^2)) \cdot 10^{-6}$$

$$Acrit_{ejeZ} = 1,917 \cdot 10^{-3} m^2$$

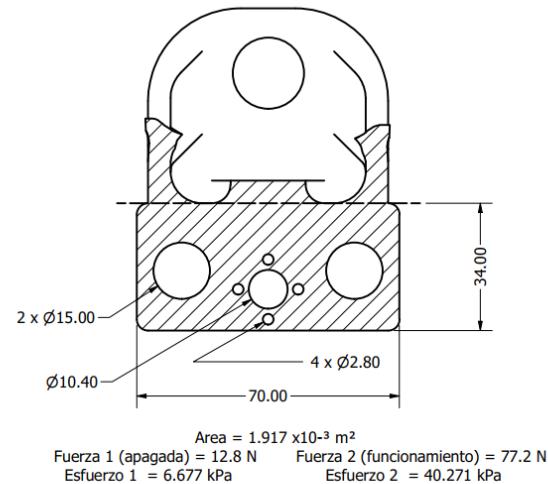


Figura 4: Corte transversal del área critica en el soporte del Dremel.

Tomando como referencia una varilla lisa en acero inoxidable 304, de 8mm de diámetro, así como el corte transversal del soporte observado en la figura 4, se calcula el esfuerzo máximo en esta pieza. Para



situaciones en que la máquina no se encuentra en funcionamiento, tenemos que:

$$\sigma_{ejeZ} = \frac{12,8N}{1,917 \cdot 10^{-3}m^2} = 6,677kPa$$

Y se calcula que en el peor caso, con una sola varilla recargada con todo el esfuerzo mecánico mencionado anteriormente.

$$\sigma_{ejeZ} = \frac{90 - 12,8N}{1,917 \cdot 10^{-3}m^2} = 40,271kPa$$

Se procede a verificar que la estructura impresa en 3D en Ácido poliláctico (PLA) donde Asmatulu [8] realiza un estudio del cual interpolamos para tener un proceso de impresión con infill de 70 % se toma como resistencia a la fluencia de 50MPa con el que se trabaja.

El factor de seguridad para este eje es de:

$$N_{ejeZ} = \frac{50 \cdot 10^6}{40,271 \cdot 10^3} = 1456,6$$

Con estos datos verificados se aproxima a calcular el peso que tendría la estructura impresa. La densidad se toma usando como referencia el estándar de densidad de $1200kg/m^3$. Se asume que la pieza tendrá un volumen de $0,08m \cdot 0,08m \cdot 0,08m$ para ser usado en cálculos de los demás ejes.

$$M_{estructuraejeZ} = 1200 \cdot 70 \% \cdot (0,08^3) = 0,43kg$$

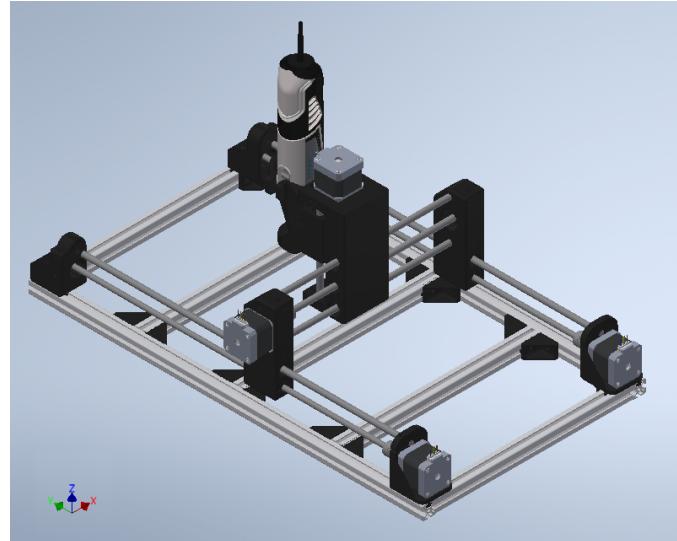


Figura 5: Diseño de la CNC en el software CAD Autodesk Inventor Professional, con sus ejes coordinados.

III-B. Eje X

Para el peso que soportará el eje X (para referencia, véase fig. 5), compuesto por dos varillas lisas y una roscada, tenemos la masa total del eje Z que corresponde a:

$$M_{ejeZ} = 1,28 + 0,43kg = 1,71kg$$

Para cuando está en trabajo la máquina, el esfuerzo cortante a la que se ve sometido el eje X es:

$$\sigma_{ejeX} = \frac{90 - 16,758N}{2,249 \cdot 10^{-3}m^2} = 32,566kPa$$

Ahora verificamos su deflexión puesto que es un factor importante para la precisión que tendrá la máquina:

$$Y_{ejeX} = \frac{-73,242 N \cdot (0,3m)^3}{48 \cdot 200 GPa \cdot \frac{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^4}{4}} = -0,001025$$

Que comparamos con los límites recomendados [7] tenemos que:



$$Y_{X_{max}} = \frac{0,001025}{300} = 3 \cdot 10^{-6} \text{mm}$$

Que corresponde a una pieza de alta precisión.

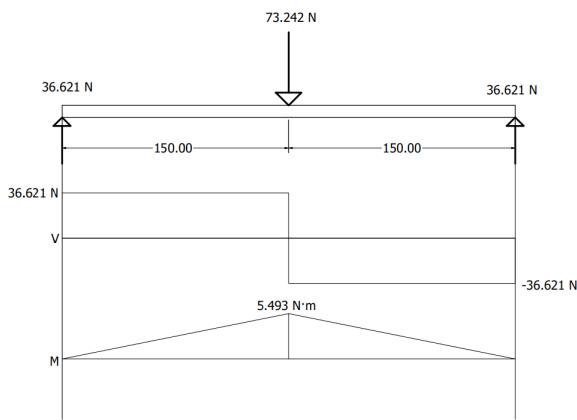


Figura 6: Diagrama de Fuerza cortante y momento fletor para las varillas en las que se desplaza el soporte sobre el eje X, en el peor caso.

III-C. Eje Y

En esta etapa se adiciona el peso de las dos varillas lisas del eje Y, de manera que el peso total que este eje soporta es de:

$$M_{ejeY} = 1,71 + 0,24 = 1,95 \text{kg}$$

$$\sigma_{EjeY} = \frac{71,292 \text{N}}{\pi(0,004)^2} = 1,41 \text{MPa}$$

$$Y_{ejeX} = \frac{-71,292 \text{N} \cdot (0,5 \text{m})^3}{48 \cdot 200 \text{GPa} \cdot \frac{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^4}{4}} = -0,004617$$

$$Y_{Y_{max}} = \frac{0,004617}{500} = 9 \cdot 10^{-6} \text{mm}$$

Que aun corresponde a una pieza de alta precisión.

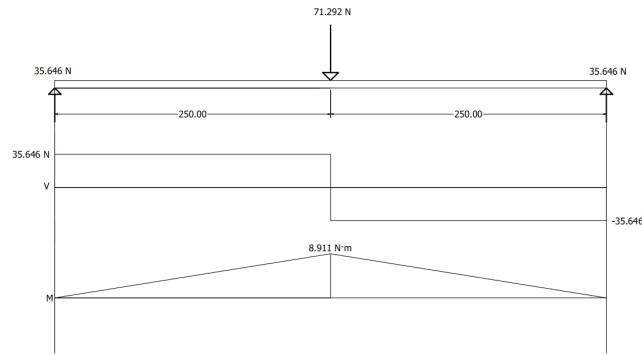


Figura 7: Diagrama de Fuerza cortante y momento fletor para las varillas en las que se desplaza el soporte sobre el eje Y, en el peor caso.

III-D. Componentes mecánicos

III-D1. Perfiles: Con las verificaciones anteriores se selecciona un perfil de aluminio T-Slot de 20mm · 20mm, junto con sus tuercas M3.

III-E. Varillas lisas

Se seleccionan varillas lisas en acero inoxidable 304 de 8mm de diámetro.

III-E1. Husillo: Para esto primero definimos las condiciones del proceso de máquinado. Basado en las recomendaciones de LPKF, Shapeoko [12] y FlatCAM, se usará un avance de $100 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$; así como usando una fresa en V de carburo de tungsteno con ángulo de apertura de 30° a una velocidad de husillo de 10000 rpm .

Partiendo de estos valores, se revisó la guía de SainSmart [13] para la cual en GRBL se tiene una aceleración mínima por default de $30 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$.

Con esta referencia se usan tornillos de potencia trapezoidales de 4 hilos en acero 304 de diámetro 8mm con un pitch de 2mm y lead de 8mm, con tuerca T8 en bronce.



III-F. Selección Rodamiento Lineales

El rodamiento lineal LM8UU reporta una capacidad de carga dinámica de: $C = 265$

$$L = \left(\frac{C}{F}\right)^3 \cdot 100000m$$

$$L = \left(\frac{265}{71,292}\right)^3 \cdot 100000m = 4,925 \cdot 10^6 m$$

Si consideramos que cada ciclo fuera la distancia completa del eje

$$Ciclos = \frac{L}{0,5m} = 9,85 \cdot 10^6$$

De manera que cumple con las condiciones.

III-G. Componentes electrónicos

III-G1. Motores: La máquina requiere un control preciso y de manera continua, por ende se seleccionó un motor paso a paso (Figura 9).

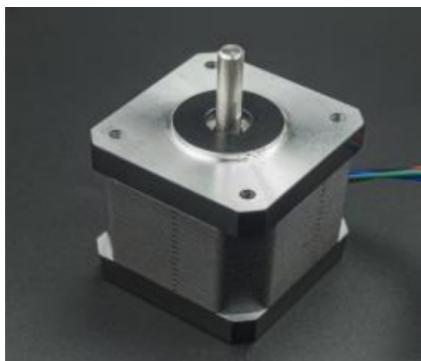


Figura 8: Motores paso a paso NEMA 17: $5,6 \text{kg} \cdot \text{cm} - 12 \text{VDC} - 1,68 \text{A}$.

Para calcular el torque requerido se usó las fórmulas para tornillos de poder de Parker Automation [14]

$$T_{Total} = T_{Friction} + T_{Accel}$$

$$T_{Friction} = \frac{\mu_s W}{2\pi p e}$$

Donde la carga tiene un peso W en onzas, un pitch p en $\frac{\text{revs}}{\text{in}}$, la eficiencia e se toma como 35% como criterio conservador para tornillos trapezoidales.

$$T_{Accel} = \frac{1}{g} (J_{Load} + J_{Leadscrew} + J_{Motor}) \left(\frac{\omega}{t}\right)$$

$$\omega = 2\pi p v$$

$$J_{Load} = \frac{W}{(2\pi p)^2}; J_{Leadscrew} = \frac{\pi L \rho R^4}{2}$$

Donde T es Torque en oz-in, ω es velocidad angular en radianes por segundo, t es tiempo en segundos, v velocidad lineal en pulgadas por segundo, L longitud de la varilla en pulgadas, R radio en pulgadas, ρ es densidad en onzas por pulgada cuadrada y $g = 386$ pulgadas por segundo cuadrado. Considerando las velocidades y el husillo ya seleccionado se asume como motor un Nema 17 de $5,6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}$ y $J_{Motor} = 68 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$.

Para el tornillo del eje Z, de 120mm tenemos que:

$$T_{Friction} = 9,26 oz - in$$

$$T_{Accel} = 0,2 oz - in$$

$$T_{Total} = 9,47 oz - in = 0,0668 Nm$$

Para el tornillo del eje X, de 300mm tenemos que:

$$T_{Friction} = 1,7 oz - in$$

$$T_{Accel} = 0,11 oz - in$$

$$T_{Total} = 1,81 oz - in = 0,0128 Nm$$

Para el tornillo del eje Y, de 500mm tenemos que:

$$T_{Friction} = 1,87 oz - in$$

$$T_{Accel} = 0,12 oz - in$$

$$T_{Total} = 1,99 oz - in = 0,014 Nm$$



Con el que identificamos que el motor Nema 17 seleccionado, cuyo torque es de $0,549\text{Nm}$ cumple los requisitos. Este motor es de 12VDC , con voltaje nominal de $2,8\text{V}$, con corriente nominal de $1,68\text{A}$.

Se usará un acople flexible de aluminio de 5mm a 8mm .

III-G2. Drivers y Control: Para el uso de GRBL se selecciona la tarjeta Arduino UNO y el shield CNC v3 que está habilitado hasta para 4 drivers, y se selecciona el driver DRV8825 puesto que soporta mayor voltaje de alimentación máximo y tiene soporte para microstepping hasta de $1/32$.

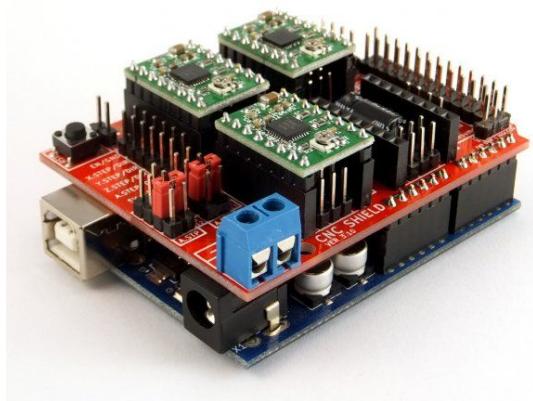


Figura 9: Arduino UNO con shield CNC V3 y 3 drivers de motor paso a paso.

III-G3. Alimentación: Dado que tendremos 4 motores con corriente nominal de $1,68\text{A}$, teniendo en cuenta un factor de protección de $1,25$ se usará una fuente conmutada de alimentación de 12VDC y 10A .

Se selecciona usar cable de cobre de calibre AWG 16.

IV. SOFTWARE

IV-A. GRBL

Es una plataforma open-source para implementación en Arduino UNO como controlador de una máquina CNC, desarrollado en 2009 y mantenido por la comunidad. [15]. Tiene un interprete de código G como subset de LinuxCNC que es soportado por la mayoría de herramientas CAM.

IV-B. Arduino

Corresponde al lenguaje utilizado para la programación del microcontrolador, acompañado de herramientas de librerías cuyo entorno permite integración sencilla con GRBL.

V. DISEÑO CAD

El CAD se desarrolló a partir del proyecto mencionado, en el software Autodesk Fusion 360 y Autodesk Inventor Professional, del cual se puede observar la vista isométrica del ensamblaje general en la figura 5. No se modelaron rodamientos, tornillos, la fresa y elementos electrónicos no involucrados en el ensamblaje mecánico. Se realizó un modelo simplificado de los tornillos de potencia, para tener una baja carga computacional para su desarrollo.

V-A. Piezas en PLA

Primero se diseñaron las uniones de los perfiles de aluminio, estos servirán de soporte de los ejes y de ajuste de los perfiles. Primero tenemos el del soporte del motor en Y como se observa en la figura 10



Figura 10: Soporte del motor en Y.



Luego tenemos la unión de los perfiles en el extremo contrario, como se observa en la figura 11.



Figura 11: Soporte de extremo contrario en Y

Posteriormente la estructura que soporta el eje X carga con un motor así como dos ejes, en la figura 12 se puede distinguir una sección en relieve para ajuste del motor.



Figura 12: Soporte del eje X.

El soporte del eje Z, se compone de una pieza móvil para acople del Dremel 14 y una pieza fija que eleva o baja el eje Z 13.



Figura 13: Soporte fijo del eje Z.



Figura 14: Soporte móvil del eje Z.

REFERENCIAS

- [1] <https://www.printedcircuits.com/what-is-a-pcb/>
- [2] <https://sites.google.com/site/wikicncdiy/pe>
- [3] <https://www.proto-electronics.com/es/blog/pcb-fr4-la-guia-del-fr-4-para-sus-circuitos-impresos>
- [4] <https://www.dremel.com/gb/en/p/dremel-4000-4000-1-45-v395>
- [5] <https://www.instructables.com/DIY-3D-Printed-Dremel-CNC/>
- [6] Yang, L. & Huang, Li & Chengyong, Wang & Zheng, Lijuan & Ma, Ping & Song, Yue. (2011). Drilling Force and Chip Morphology in Drilling of PCB Supported Hole. *Advanced Materials Research*. 188. 429-434. 10.4028/www.scientific.net/AMR.188.429.
- [7] Padilla Ortiz, R. N. (2017). Diseño y construcción de una cortadora láser para papel con interfaz gráfica (Bachelor's thesis).
- [8] Asmatulu, Eylem & Alonayni, Abdullah & Subeshan, Balakrishnan & Rahman, Muhammad. (2018). Investigating compression strengths of 3D printed polymeric infill specimens of various geometries. 21. 10.1117/12.2296651.
- [9] R. Mott, Resistencia de Materiales Aplicada, México, 2006.
- [10] Khandpur, R. S. (2006). Printed circuit boards: design, fabrication, assembly and testing. Tata McGraw-Hill Education.
- [11] Ayala Peláez, C.A., Rodríguez Palomino, E. A. (2018). Protocolo para diseño de tarjetas de circuitos en máquina ruteadora. Ingenierías USB Cali.
- [12] <https://wiki.shapeoko.com/index.php/Materials#PCB>
- [13] <https://docs.sainsmart.com/article/9m0rbnw6k1-introduction-to-cnc-for-a-total-novice-tuning-gbrl-settings>
- [14] Parkermotion.com. 2021. Engineering Reference Guide. [online] Available at: https://www.parkermotion.com/literature/pdf/pg232_eng_sftwr.pdf [Accessed 17 June 2021].
- [15] Gnea. (n.d.). Home . gnea/grbl wiki. GitHub. <https://github.com/gnea/grbl/wiki>.