



**Design and construction of a multifunction machine prototype
for additive and subtractive manufacturing using computer
numerical control CNC**

**Diseño y construcción de un prototipo de máquina
multifunción para la manufactura aditiva y sustractiva
mediante control numérico computarizado CNC**

Para citar este trabajo:

Catota Pinthsa, P. J. ., Rodríguez Puruncaja , J. A. ., Espín Rosales , J. A. ., & Chuquitarco Aguayo , E. A. . (2026). Diseño y construcción de un prototipo de máquina multifunción para la manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado CNC. *Educational Regent Multidisciplinary Journal*, 3(1), 1-30. <https://doi.org/10.63969/xjedwh30>

Autores:

Pablo Jordan Catota Pinthsa

Universidad de las Fuerzas Armadas

Quito - Ecuador

pjcatota@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-2991-7616>

Jason Alexander Rodríguez Puruncaja

Universidad de las Fuerzas Armadas

Quito - Ecuador

jarpdrums95@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-9349-5569>

Jonathan Antonio Espín Rosales

Universidad de las Fuerzas Armadas

Quito - Ecuador

jonantonio555@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0007-0278-4055>

Elsa Alexandra Chuquitarco Aguayo

Universidad de las Fuerzas Armadas

Quito - Ecuador

eachuquitarco@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-9905-1402>

Autor de Correspondencia: Pablo Jordan Catota Pinthsa, pjcatota@espe.edu.ec

RECIBIDO: 16-Diciembre-2025

ACEPTADO: 30-Diciembre-2025

PUBLICADO: 13-Enero-2026



Resumen

La fuerte competencia y exigencias del mercado mundial en la industria manufacturera hace cada vez más necesario el uso de tecnologías avanzadas y el estudio de métodos de trabajo más efectivos y precisos. La automatización de máquinas herramientas de control numérico computarizado (CNC) ha alcanzado gran importancia en la industria manufacturera, optimizando recursos y disminuyendo errores en la producción por falla humana. En el presente trabajo se realizó el diseño e implementación de una máquina CNC de tres ejes para manufactura aditiva y sustractiva combinados en una sola máquina. Para crear un diseño óptimo y funcional fue necesario establecer parámetros en las tres aplicaciones a realizar, se investigó las velocidades y los parámetros que influyen en el corte láser, las variables que intervienen en una impresión 3D y las características técnicas necesarias para llevar a cabo un tallado en madera. Todas estas aplicaciones para un área de trabajo de 600 mm x 600 mm con una altura de 200 mm en el caso de impresión 3D y 150 mm en el caso de tallado. Como apoyo, para realizar simulaciones estructurales se diseñó el sistema en software CAD para luego realizar su respectivo análisis CAE donde se verificó que los tamaños de los elementos creados soportan las cargas producidas en los procesos realizados. Por las diferencias en los parámetros de velocidad y torque se requirió diseñar dos puentes donde se ubican los tres procesos antes mencionados con diferentes transmisiones de movimiento que permitan ejecutar las aplicaciones con los parámetros ideales. Para el control de los movimientos y accionamiento de los componentes eléctricos se utilizó el firmware MARLIN que permite generar diferentes tipos de aplicaciones CNC a partir de una tarjeta de control dentro de la cual se implementan todos los actuadores necesarios. Para las pruebas se utilizó la norma ISO 10360-2 2009 con el fin de determinar la precisión y repetibilidad de la estructura, adicional se implementó pruebas en figuras geométricas verificando el error en todos los procesos llevados a cabo. Finalmente se han establecido conclusiones y recomendaciones. Con el diseño e implementación del presente prototipo se pretende en el mecanizado: reducir tiempos de fabricación, mejorar el acabado superficial, fabricar piezas más complejas; en lo académico: disponer de un prototipo para realizar prácticas de mecanizado; y en lo industrial disponer de una máquina accesible en costo, operación y mantenimiento.

Palabras clave: Control numérico computarizado; centro de mecanizado vertical; códigos G; tecnología CAD/CAM.

Abstract

The strong competition and demands of the global market in the manufacturing industry make the use of advanced technologies and the study of more effective and precise working methods increasingly necessary. The automation of computer numerical control (CNC) machine tools has gained great importance in the manufacturing industry, optimizing resources and reducing production errors due to human failure. In the present work, the design and implementation of a three-axis CNC machine for additive and subtractive manufacturing combined in a single machine was carried out. To create an optimal and functional design, it was necessary to establish parameters for the three applications to be performed. The speeds and parameters that influence laser cutting were researched, as well as the variables involved in 3D printing and the technical characteristics necessary to carry out wood carving. All these applications are for a work area of 600 mm x 600 mm with a height of 200 mm in the case of 3D printing and 150 mm in the case of carving. As support, to perform structural simulations, the system was designed in CAD software and then its respective CAE analysis was carried out, where it was verified that the sizes of the created elements withstand the loads produced in the processes carried out. Due to differences in speed and torque parameters, it was necessary to design two gantries where the three aforementioned processes are located, with different motion transmissions that allow the applications to be executed with ideal parameters. For the control of movements and activation



of electrical components, the MARLIN firmware was used, which allows the generation of different types of CNC applications from a control board in which all necessary actuators are implemented. For the tests, the ISO 10360-2 2009 standard was used to determine the accuracy and repeatability of the structure; additionally, tests were carried out on geometric figures verifying the error in all processes performed. Finally, conclusions and recommendations have been established. With the design and implementation of this prototype, the aim in machining is to reduce manufacturing times, improve surface finish, and manufacture more complex parts; in academia, to have a prototype for carrying out machining practices; and in the industrial field, to have a machine that is accessible in terms of cost, operation, and maintenance.

Keywords: Computer numerical control; vertical machining center; G-codes; CAD/CAM technology.



1. Introducción

Con el rápido desarrollo de la ciencia y la tecnología, los medios convencionales de fabricación están perdiendo espacio debido a algunas técnicas no convencionales como la impresora 3D, láser cortador, etc. El uso de estas técnicas poco convencionales no sólo revolucionó el proceso de fabricación, pero también acelera el proceso y también aumenta la precisión (Shahid, 2019)

El uso de máquinas CNC para manufactura aditiva y sustractiva en los actuales momentos se ha convertido en el eje principal de investigación científica en los últimos años a nivel de industria 4.0, sin embargo, a escala nacional aún no se evidencia trabajo investigativo respecto a dicho tema.

Con el planteamiento de una máquina multifuncional que englobe tres aplicaciones diferentes de la manufactura se solventa el problema de las estructuras individuales que acrecientan los trabajos y los costos para la elaboración del armazón de las mismas, puesto que en este caso compartirán una misma estructura en donde se pueda ejecutar cada una de estas tres aplicaciones, lo cual es altamente factible debido a que los tres procesos utilizan una armazón basado en un sistema cartesiano para su funcionamiento.

La unión de estas tres máquinas de manufactura significa una gran reducción de costos innecesarios en todos los aspectos, permitiendo de esta manera que el operario pueda usar una sola estructura para la realización de manufactura aditiva y sustractiva reduciendo la complejidad de usar tres máquinas diferentes y espacios exagerados que obtendría al adquirir cada una de estas estructuras por separado.

2. Diseño Mecatrónica de la máquina

2.1 Alternativas de solución

De la investigación documental realizada y considerando la línea base del Laboratorio CNC de la ESPE Latacunga, se desprende que las alternativas de solución están en relación directa con sus componentes como son: a) Estructura y sistema de movimiento, b) Mesa de trabajo, c) Guías de movimiento y sistema de transmisión, d) Interacción de cabezales, e) Actuadores, f) Control, g) Software de control y h) Cabezal de impresión 3D.

2.2 Parámetros de diseño.

Volumen de trabajo

Para el volumen de trabajo se debe tener en cuenta el análisis a la línea base en donde se denotó que en cuanto a impresión es necesario volúmenes normales de impresión, capaz de ser utilizado con facilidad por los estudiantes, mientras que para fresado y corte láser no es necesario grandes volúmenes ya que la máquina tiene fines didácticos, dicho esto las dimensiones ideales máximas para el volumen de trabajo basado en medidas utilizadas en el mercado considerando $\frac{1}{4}$ de plancha serían 60X60x20 cm

Tamaño estimado de la maquina

Para el tamaño total de la máquina se consideró el armazón externo de la misma sumado a la mesa de trabajo y un área en donde se instalarán la mayoría de los dispositivos electrónicos de control y los elementos necesarios para llevar a cabo los tres procesos descritos por lo que el tamaño para la maquina será de 1200X1500 mm aproximadamente según las medidas de las máquinas analizadas.

Manufactura sustractiva mediante corte por láser

Potencia, velocidad y espesor.



Existe una relación intrínseca entre los valores de la potencia láser con la velocidad y espesor de corte láser, mientras mayor es la potencia del láser, mayores espesores de material se pueden trabajar y se puede utilizar velocidades de corte más altas. En los proyectos e investigaciones revisadas anteriormente se puede observar diferentes tipos de láser, con diferentes potencias, existen láseres industriales con un fuerte haz de luz, pero en este caso no es necesario este tipo de efectores, como se apreció en el análisis de la línea base, es necesario proveer una herramienta capaz de ayudar al estudiante a practicar sus destrezas en esta área. Comparando las diferentes máquinas expuestas en el estado de arte se concluyó que la potencia laser más común y la más usada para fines didácticos es la de 40 W, por lo que es la elegida para la realización de este proyecto.

La velocidad de corte y el espesor dado esta potencia de láser se detallan en la tabla

Tabla. 1. Relación de velocidades y espesores con respecto a la potencia del láser

Material	CORTE			GRABADO	
	Espesor en mm	Velocidad en mm/ssg	Rango de potencia	Velocidad en mm/ssg	Rango de potencia
MDF	3	15-20	40-60	200-400	30-50
	6	10-15	60-70		
	9	5-8	80-85		
	12	3-8	85-90		
Acrílico	3	10-20	40-65	200-400	20-35
	6	6-10	60-70		
	9	5-7	80-85		
	12	2-5	92-93		
	18	1-2	85-90		

La velocidad para corte láser máxima tomando en cuenta la tabla sería 400 mm/seg y la mínima dado que se propone una potencia de 40 W sería de 200 mm/seg. Los espesores máximos que se pueden mecanizar serán 4 mm en MDF y 3 mm en acrílico.

Manufactura sustractiva mediante fresado

Materiales, velocidad de corte, fuerza específica de corte.

Para definir los parámetros de fresado se debe realizar un análisis del material a mecanizar, según los proyectos revisados en el capítulo 2, se encuentra máquinas de fresado que trabajan con materiales duros como acero y aluminio, además de otras que trabajan con materiales blandos como madera y plásticos, dado que el proceso de fresado implementado en este proyecto tiene fines didácticos y educativos, los materiales a mecanizar serán madera y plásticos.

Tabla. 2. Velocidades de corte para diferentes materiales

Material	V_c (mm/min)
Madera dura	400
Madera blanda	600
Contrachapado	600
Aluminio	350
Plásticos	250-600

La velocidad de corte mínima tomada para este proyecto es de 400 mm/min, que corresponde a madera dura, que es el límite en cuento a materiales duros para trabajar. Con esta información se procede a encontrar la fuerza de corte, tomando en cuenta que el diámetro de la fresa para



aplicaciones didácticas y no industriales según la investigación realizada en el capítulo 2 oscila entre 4 - 6 mm.

La fuerza de corte y demás parámetro que van a ser utilizados para el diseño se calculan mediante fórmulas descritas en (Caicedo Damian, 2018), dando como resultado una fuerza específica de corte $k_c=600 \text{ N/} [\text{mm}]^2$ y una fuerza de corte $F_c=180 \text{ N}$. La potencia neta del motor es de 0.4 KW.

Estos valores han sido calculados mediante fórmulas de mecanizado, tomando en consideración la velocidad de corte dada por el material y la fuerza específica de corte para un espesor medio de viruta para la madera.

Al igual que para la velocidad de corte, la velocidad de avance depende del material que se va a mecanizar, teniendo en cuenta que se operará en madera dura y que el tamaño máximo de la fresa a utilizar es de 6 mm se tiene el anexo 1, donde se ilustra las velocidades de avance para diferentes materiales, dependiendo del diámetro de la fresa y de las revoluciones del husillo; para fresas standard con 6 mm de diámetro se tiene una velocidad de giro $n=9900 \text{ RPM}$, y una velocidad de avance $V_f=1500 \text{ mm/min}$. Y para la fuerza de avance en taladrado se tiene una fuerza de avance de $F_f=256 \text{ N}$.

Manufactura aditiva mediante impresión 3D

Material y Temperatura para impresión 3D

Según la investigación y según los materiales a imprimir previa sobre las impresoras 3D desarrolladas como proyectos se establece algunos de los materiales más utilizados para impresión 3D, así como ABS, PLA o Nylon, existe una preferencia por el filamento de ABS dentro de este tipo de máquinas debido a la facilidad de adquisición y económico precio, por lo cual se utilizará dicho filamento de ABS con diámetros de 1.75 mm como en el caso de los proyectos analizados en el capítulo II.

Dependiendo del tipo de material a usar, se tiene una temperatura adecuada del extrusor para fundir el filamento, para lo cual se tiene la tabla 23.

Tabla. 3. Temperaturas para diferentes materiales

Material	Temperatura de impresión
ABS	240
PLA	220
PET	230
NINJAFLEX	250
NYLON	260

Diseño del puente transversal

Para saber si el diseño del puente satisface la seguridad requerida por la máquina se debe tomar en cuenta las fuerzas que intervienen en su estructura y analizar los esfuerzos resultantes, la



fuerza de corte que ejerce el cabezal al entrar en contacto con la madera se transfiere desde el punto A hasta el punto C, pero adicional a esta fuerza, existe un momento flector formado por la distancia desde donde se produce la fuerza hasta el punto de aplicación del momento en este caso el punto C, al ser tomado el puente como una viga DE se toma en cuenta esta fuerza aplicada sobre el punto C además del momento flector, de esta manera se tiene una viga sometida a flexión, por una fuerza y un momento flector como se muestra en la figura 1.

Tabla. 3. Diagrama de fuerzas para el puente transversal

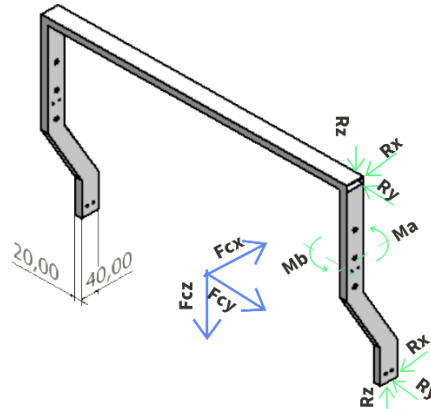


Fig. 1. Mecanismo de movimiento del eje Y

La fuerza de corte ya se ha calculado con anterioridad $F_c = 180 \text{ N}$, mientras que el momento flector se calcula con la siguiente fórmula.

$$M_A = F_c * d_{AB}$$

La mayor distancia entre estos dos puntos dado el máximo del recorrido en el eje Z es $d_{AE} = 200 \text{ mm}$, conociendo este dato el momento resultante es:

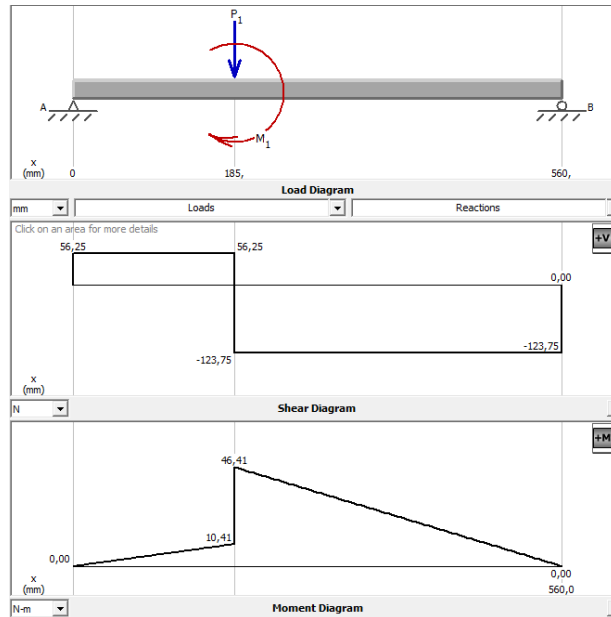
$$M_A = 180 \text{ N} * 0.2 \text{ m}$$

$$M_A = 36 \text{ Nm}$$

Conociendo estos datos ya se puede analizar la viga DE que es una de los puntos críticos de la máquina, dicha viga posee apoyos en sus extremos al tratarse de un puente estático, una fuerza de corte en el punto C y un momento flector en el mismo punto, para encontrar el esfuerzo en dicho punto, se encuentra primero el momento máximo de la viga mediante el software MDSolids con los siguientes datos.

$$d_{DE} = 560 \text{ mm}, d_{DC} = 185 \text{ mm}$$

Fig. 2. Graficas de fuerzas y momentos flectores en software MDSolid



Como se puede observar en la figura 7 el resultado de las reacciones en los puntos de apoyo D y E son de $R_{Dy} = 56.21 \text{ N}$ y $R_{Ey} = 123.75 \text{ N}$, mientras que el momento flector máximo en la viga es de $M_{DE} = 46.41 \text{ Nm}$, con estos datos se calcula el esfuerzo flector mediante la siguiente formula:

$$\sigma_{DE} = \frac{M * c}{I}$$

La sección transversal seleccionada para el elemento a diseñar es tubo rectangular por su alto momento de inercia y debido a que el tamaño de uno de sus lados tiene que ser de 40 mm para sostener los elementos que van montados en el eje Y.

El material escogido que se ha tomado en cuenta para este diseño es acero estructural A36, debido a que en el estado de arte la mayoría de los proyectos utilizan este material y por ser el más común en el mercado, cuya resistencia de cadencia es de $S_y = 250 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{DE} = \frac{250 \text{ MPa}}{2} = 125 \text{ MPa}$$

Conociendo los valores del esfuerzo de diseño el momento flector y el centroide del tubo se calcula la inercia de diseño para el elemento:

$$I_D = \frac{M * c}{\sigma_{DE}}$$

$$I_D = \frac{46410 \text{ Nmm} * 10 \text{ mm}}{125 \text{ N/mm}^2}$$

$$I_D = 3712 \text{ mm}^4$$

La inercia de un tubo rectangular es igual a:

$$I = \frac{b1 * h1^3}{12} - \frac{b2 - h2^3}{12}$$

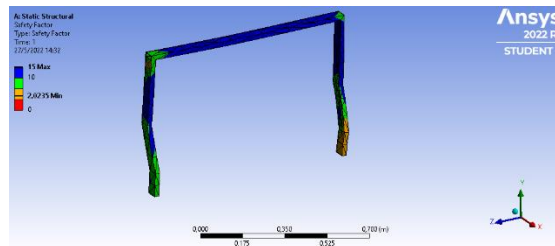
Conociendo los valores de base y altura del tubo se debe encontrar el espesor para el tubo teniendo como resultado la siguiente expresión:



$$I = \frac{(40 \text{ mm}) * (20 \text{ mm})^3}{12} - \frac{(40 \text{ mm} - 2e) - (20 \text{ mm} - 2e)^3}{12}$$
$$12 * I = -16e^4 + 800e^3 - 14400e^2 + 112000e$$
$$16e^4 - 800e^3 - 14400e^2 - 112000e + 44544 = 0$$
$$e = 0.6 \text{ mm}$$

Con este valor de espesor se simula en el software Ansys para comprobar el factor de seguridad obtenido mediante calculo teniendo el resultado mostrado en la figura.

Figura 3. Factor de seguridad según el software Ansys



Tomando en cuenta las demás direcciones de las fuerzas de corte, para F_{cx} se tiene el mismo momento flector que en el caso desarrollado, pero la inercia para este momento flector es mayor ya que la base es de 20 mm y la altura de 40 mm, y finalmente F_{cz} genera la reacción R_z comprimiendo el elemento, por lo que para calcular este esfuerzo normal se aplica la fórmula:

$$\sigma_{DE} = \frac{F_{cz}}{A} ; A = \frac{F_{cz}}{\sigma_{DE}} A = \frac{180 \text{ N}}{125 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1.44 \text{ mm}^2$$

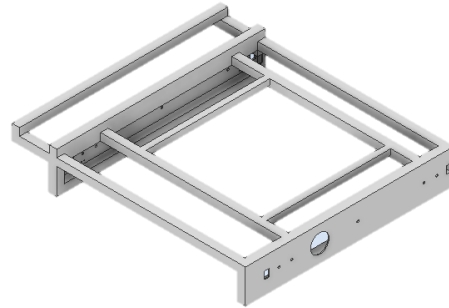
Esta área calculada es menor a la de la sección transversal calculada anteriormente por lo que el modelo calculado es seguro.

Diseño de la base estructural.

Para la base estructural de la maquina se ha tomado en cuenta el mismo material anteriormente seleccionado, para lo cual se tiene varias opciones vistas en el estado de arte capitulo II, se ha tomado en cuenta en precio de cada uno de estos materiales, el más económico para el proyecto y con un alto grado de rigidez es acero estructural, el cual es bastante accesible en el medio y fácil de manipular.

La sección transversal escogida para la estructura es tubo cuadrado por su alto valor de inercia y por la estética que le generan al diseño mostrado en la figura 4.

Figura 4. Diseño de la base estructural



Para el cálculo se debe primero analizar las fuerzas que van a afectar a la estructura, dicho esto se tiene una sección en la parte posterior donde va colocado el tubo láser con un peso aproximado de 4 kg, en el centro de la estructura está dispuesta la mesa de trabajo y la pieza de trabajo, se ha considerado un peso de 25 kg como máximo para estos elementos, y finalmente se tiene los componentes que se encuentran en los tres ejes de desplazamiento, los cuales se consideran con un peso máximo total de 50 kg, dando como peso total de $Wt=79 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 774.2 \text{ N}$ a este se le suma la fuerza de corte que también interviene en la máquina $Wt=774.2 \text{ N} + 180 \text{ N} = 954.2 \text{ N}$.

Utilizando el programa MDSolid se obtuvo un momento flector de 231,393 Nm, este dato será utilizado para encontrar el tamaño de la sección transversal mediante la aplicación de la ecuación 3-3, el esfuerzo de diseño es el mismo que en la sección anterior, por lo que se tiene:

$$\frac{I}{c} = \frac{231393 \text{ Nmm}}{125 \text{ MPa}}$$
$$\frac{I}{c} = 1851.14 \text{ mm}^3$$

Con este dato se escoge un tamaño para el tubo cuadrado analizando a inercia y el lado del mismo. El tamaño que más se acerca a este valor es de la sección 40x40 con un espesor de 1 mm.

Para el cálculo se usará estos valores de base y altura con el fin de encontrar el espesor exacto que cumpla con el factor de seguridad propuesto, dicho esto se tiene:

$$I = \frac{(40 \text{ mm}) \cdot (40 \text{ mm})^3}{12} - \frac{(40 \text{ mm} - 2e)(40 \text{ mm} - 2e)^3}{12}$$

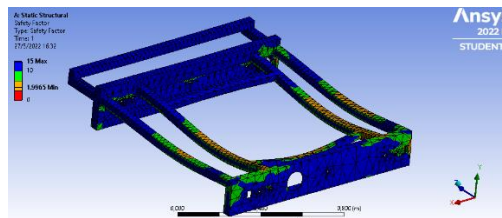
$$12 \cdot 1851.14 \cdot 20 = -16e^4 + 1280e^3 - 38400e^2 + 512000e$$

$$16e^4 + 1280e^3 - 38400e^2 - 512000e + 444273.6 = 0$$

$$e = 0.93 \text{ mm}$$

Con esta sección transversal calculada se pasa al software Ansys donde se comprueba el factor de seguridad tomado para el cálculo.

Figura 5. Análisis estructural de la base estructural

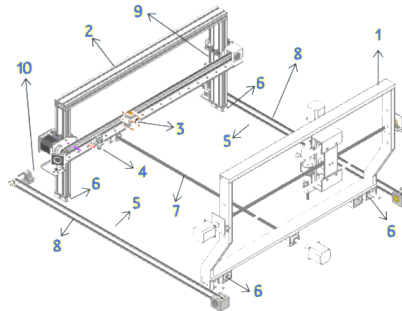


Diseño del sistema de movimiento Ejes X, Y, Z



Para el movimiento coordinado de los ejes de la máquina se necesita primero diseñar mediante teoría mecánica cada uno de los componentes que intervienen en este proceso, cabe recalcar que para redistribuir de mejor manera las aplicaciones a ser implementadas en la máquina, se van a diseñar dos puentes transversales, el primero (1) se dispondrá para la aplicación de fresado CNC puesto que esta requiere un diseño más consistente por las fuerzas a las cuales se ve sometido, mientras que el otro puente (2) va a poseer los cabezales para las aplicaciones de impresión 3D (3) y corte láser (4), cuyo diseño puede ser más frágil porque no se ven sometidos a fuerzas de consideración.

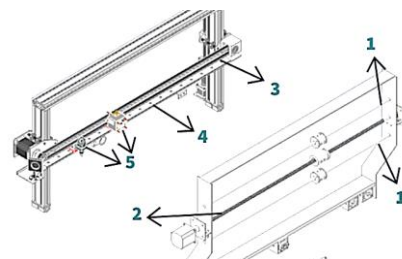
Figura 6. Sistema de movimiento eje x



Diseño del sistema de movimiento para el Eje Y

El sistema de movimiento del eje X es similar en su composición al del eje Y diseñado previamente, posee dos guías cilíndricas lineales (1) (sección 2.4.3.1) para poder guiar el movimiento del cabezal de fresado, y la transmisión del movimiento se realiza mediante un husillo de bolas (2) (sección 2.4.3.2), que transforma el movimiento rotacional del motor en movimiento lineal, este sistema se encuentra montado sobre la estructura del eje X, de esta manera se genera el desplazamiento en los ejes X, Y de manera coordinada como se muestra en la figura 11, esto para el carro de fresado, mientras que para el carro de corte laser e impresión 3D, se tiene un mecanismo de polea y correa (3) (sección 2.4.3.2) montado conjuntamente con guías lineales hiwin (4) (sección 2.4.3.1) que poseen su respectivo bloque deslizante en donde se montan los cabezales (5) como se muestra en la figura 14 .

Figura 7. Mecanismo de movimiento del eje Y

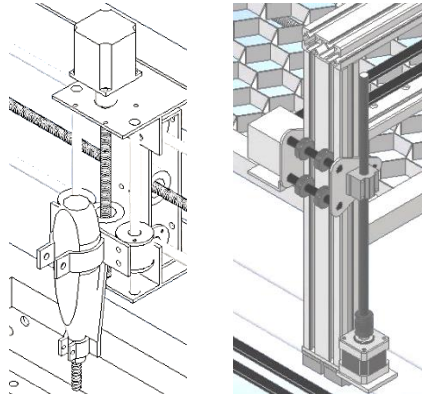


Diseño del sistema de movimiento para el Eje Z

Para el diseño del eje Z del carro de tallado se usará dos guías cilíndricas como las ya vistas en secciones anteriores las cuales irán montadas sobre el eje Y, de esta manera se reduce la cantidad de elementos a elevar si se compara con la elevación de todo el puente, lo que resulta beneficioso en la reducción del material a usar y la complejidad del diseño, estas dos guías se encuentran a los lados de un husillo de bolas que será el encargado de mover el cabezal de tallado que en este caso será una fresadora sujeta a este mecanismo como se observa en la figura , mientras que para

el carro de impresión y corte láser también se usará un husillo de bolas pero en este caso las guías vendrán dispuestas en formas de perfiles de aluminio cuyo movimiento se realiza mediante rodamientos como se observa en la figura.

Figura 8. Mecanismo de movimiento del eje Z



Selección de componentes eléctricos

Para el funcionamiento de la máquina se necesitan seleccionar los componentes eléctricos que permiten el movimiento de los ejes así como el accionamiento de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en esta estructura, como base principal del sistema eléctrico se tiene la tarjeta RAMPS 1.4, a partir de la misma se van a escoger los elementos que van conectados a la misma.

Drivers para eje X.

Para el puente transversal de fresado se seleccionó un motor Nema 23 M1233051, en la ficha técnica del motor (Anexo 7) se observa el valor de corriente en cada fase igual a 3 Amperios, conociendo este dato se busca un driver con la capacidad de brindar dicho amperaje. El driver TB 6600 posee una corriente pico de 4 A y una entrada de fuente de voltaje de 0 - 45 voltios (TOSHIBA, 2012). Para la configuración de la corriente este driver posee tres interruptores, cuyas combinaciones permiten entregar cierta corriente al motor conectado, estas configuraciones se muestran en la tabla.

Tabla 3. Configuración de corriente para driver TB6600

Corriente A	Corriente máxima	S4	S5	S6
0.5	0.7	ON	ON	ON
1	1.2	ON	OFF	ON
1.5	1.7	ON	ON	OFF
2	2.2	ON	OFF	OFF
2.5	2.7	OFF	ON	ON
2.8	2.9	OFF	OFF	ON
3	3.2	OFF	ON	OFF
3.5	4	OFF	OFF	OFF

El motor escogido para el segundo puente transversal de corte láser e impresión 3D es un Nema 23 GM57HS56-1504, su corriente nominal es de 1.5 A, teniendo este dato se selecciona un driver



DVR8825, el cual es un controlador para motores a paso, que suministra corriente a motores de hasta 2.5 A (Instruments, 2014), además existe facilidad de obtención en el mercado, su ficha técnica se presenta en el anexo 10. La conexión del mismo es montada sobre la tarjeta Ramps 1.4, la misma posee pines definidos para este tipo de driver.

Drivers para eje Y.

En el eje Y se tiene igualmente dos motores para los dos puentes transversales de la máquina, para el puente de fresado el motor elegido es Nema 23 M1233011 que posee una corriente nominal de 0.62 A, por lo que se hace idóneo el uso de un driver DVR8825, y para el puente de corte láser e impresión 3D se seleccionó un motor a pasos Nema 17 M1173021 con una corriente nominal 1.3 A con lo cual también se elige para el mismo un driver DVR8825.

Drivers para eje Z.

El eje Z de la máquina está compuesto por tres motores a pasos, el puente transversal de fresado posee un motor a pasos Nema 17 M1173031 con una corriente nominal de 1.7 A y el puente transversal de corte láser e impresión 3D es un Nema 17 M1173021 con una corriente nominal de 1.3 A, para ambos casos el driver seleccionado es un DRV8825 puesto que suministra el nivel de corriente que requieren los mismos.

Fuente para energizar tarjeta de control.

El sistema eléctrico tiene como principal herramienta la tarjeta controladora Ramps 1.4, la cual soportará a 3 motores para los movimientos de los ejes lineales, además de todos los componentes que vienen montados en la misma, por lo cual el fabricante de la tarjeta recomienda bajo este criterio que se use una fuente de 12 voltios que es el voltaje nominal de la tarjeta y una corriente de 20 A, este valor se obtiene al sumar la corriente que necesita la tarjeta Ramps 1.4, la misma que tiene dos puertos de 11 A y 5 A cada uno de estos dando un total de 16 A y sumado a la corriente consumida por el láser (4 Amperios).

Fuente para energizar driver TB600.

Dado que el driver TB600 utiliza una corriente de 0 a 4.5 A, tiene que ser energizado por una fuente de mayor potencia, para lo cual el voltaje de entrada de dicho driver es de 0 a 40 voltios y el amperaje es de 0 a 4.5 A, la fuente idónea para el funcionamiento del mismo es de 36 voltios a 5 Amperios.

Fuente para energizar el módulo láser.

Para energizar el módulo láser se utilizará la misma fuente de 12 voltios y 20 amperios ya que cumple con los requerimientos definidos por el productor del módulo láser a utilizar, es decir que para la conexión de la tarjeta controladora y el módulo láser se utilizará la misma fuente por facilidad de uso.

Selección de módulo láser

El proceso de corte láser depende de varios componentes que deben ser seleccionados dependiendo de la potencia con la que se va a trabajar, como se especificó en la sección , la potencia para el sistema implementado debe ser de 40 W por lo que se elige un módulo que cumpla con esta especificación.

Selección de cabezal de fresado CNC

El motor para usar el giro de la herramienta va a ser determinado dependiendo de la velocidad de revolución y la potencia neta encontrada en parámetros de diseño sección 4.1, esta velocidad de revolución es de 9900 RPM y la potencia neta de trabajo es de 0.4 KW. El control del cabezal



de fresado es otra de las características de interés, a partir del sistema eléctrico usado, el mecanismo ideal es mediante PWM a través una tarjeta de control. Dados estos parámetros se tienen diferentes tipos de cabezales de fresado, dependiendo de la velocidad de revolución, la potencia del motor, el método de sujeción y el método de control de la velocidad en el husillo.

Se ha analizado una lista de cabezales para fresadoras pequeñas en donde se encuentra potencias a partir de 500 W y con diferentes velocidades de operación, el cabezal ideal siguiendo los parámetros indicados es un 500 W CNC Air Cooled Spindle, el cual posee un rango de velocidad de hasta 12000 RPM como se puede observar en la figura 19, tiene una boquilla de sujeción collet ER11 que permite fijar fresas de hasta 7 mm y la forma de control de velocidad en mediante PWM, que se puede cómodamente realizar desde una tarjeta de control como en este caso.

Figura 9. Características de cabezal de fresadora



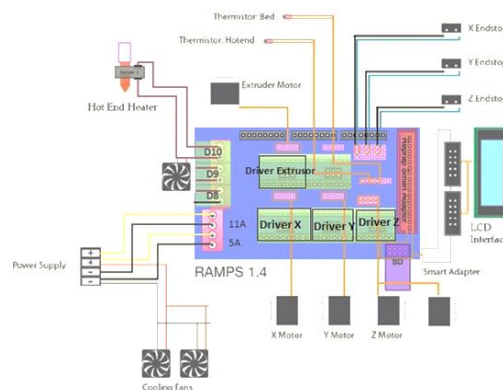
Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

Recuperado de (LLC, 2018)

Diagrama eléctrico para corte láser e impresión 3D y fresadora CNC

El sistema eléctrico se compone de dos partes fundamentales, la primera tiene que ver con las aplicaciones de corte láser e impresión 3D, para la cual se usan motores drivers y sistemas de operación específicos para la aplicación, mientras que para fresado se usan diferentes motores guías, sistemas de movimientos y drivers. La conexión para estos dos sistemas es similar puesto que se utilizan motores para generar movimiento en los tres ejes, lo que cambia es el accionamiento de efectores finales.

Figura 9. Diagrama eléctrico para puente de corte láser e impresión 3D



Recuperado de (Createc, 2016)

3. Implementación y pruebas



Construcción de la estructura base.

El diseño de la estructura base realizado en el apartado 3.6, arrojó como resultado la construcción de la misma con un tubo cuadrado de 40x40 cm, el cual va soldado formando la estructura previamente mostrada la figura 21, para la construcción del mismo se ha utilizado 12 metros de dicho tubo.

Figura 11. Construcción de la estructura base.



Implementación de las guías cilíndricas

Para el desplazamiento de los carros en el eje X se han dispuesto dos guías cilíndricas, en el apartado de diseño se encontró un diámetro de 24 mm para soportar las cargas montadas sobre las mismas, pero debido a la escasez de las mismas en el medio local se optó por guías cilíndricas apoyadas en una base prismática, el valor de diámetro más alto encontrado en el medio para la misma es de 16 mm, lo cual sumado a la rigidez de la base es suficiente para soportar las cargas previstas. Las guías se han fijado en los extremos de la estructura base, con una conexión mediante pernos como se muestra en la figura

Figura 12. Construcción de las guías cilíndricas



Construcción estructural del puente.

La estructura del puente se lo realiza utilizando un tubo cuadrado de 40x20 mm como se especifica en la sección 3.5, el espesor mínimo para este tubo en el mercado es de 1.2 mm, para su construcción se necesita realizar cortes precisos y soldar cada una de las partes que conforman el puente, en la parte baja del puente se ha colocado una terminación que permita sujetar mediante pernos el puente a la plancha que a su vez se encuentra unida a los rodamientos lineales de la guía cilíndrica, permitiendo el movimiento del mismo a lo largo del eje X, como se observa en la figura.

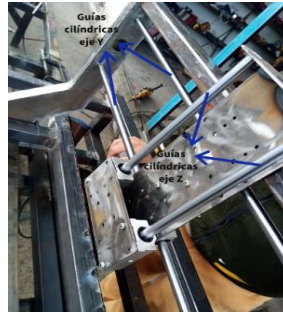
Figura 13. Construcción estructural del puente



Implementación del sistema de movimiento para ejes X, Y, Z.

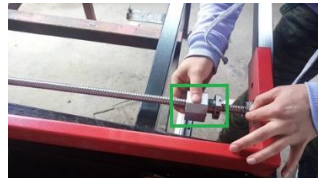
Para el movimiento del eje Y del puente de fresado es necesario colocar las guías cilíndricas de 16 mm, calculadas en la sección 3.7.2, sobre las mismas irán montados rodamientos lineales que servirán de soporte para el mecanismo de movimiento del eje Z, el cual también posee un par de guías cilíndricas de 12 mm donde va montado el cabezal de fresado, como se puede ver en la figura 14.

Figura 14. Implementación de guías para el eje Y, Z



Para la transmisión del movimiento se implementa un tornillo de bolas tanto en el eje Y como en el Z, de 16 mm y 12 mm respectivamente, este se dispone entre las dos guías como se observa en la figura

Figura 15. Colocación del tornillo de bolas para el eje Y



Montaje de cabezal de fresado y motores.

El cabezal de fresado para este puente es colocado en la estructura que se ha armado sobre las guías del eje Y, sujetado a un tornillo de bolas de 12 mm calculado en la sección 3.7.3, todos estos tornillos de bolas van acoplados a motores a pasos nema en sus extremos, donde son fijados al puente mediante pernos como se puede observar en la figura.

Construcción del puente de impresión 3D y corte láser.

El puente de impresión y corte laser tiene diferente sistema de movimiento que el puente de fresado en sus ejes, en este caso los ejes X y Y utilizan un movimiento por correas mientras que para el eje Z se tiene dos tornillos de bolas ubicados a los lados del puente, permitiendo de esta



manera subir y bajar el eje Y con los respectivos cabezales de trabajo. Va montado sobre las mismas guías cilíndricas antes establecidas, su diseño se puede observar en la figura 11, consta de un puente estructural, una guía prismática para el eje Y, de un soporte para los cabezales y los mecanismos de polea y correa tanto para el eje X como para el eje Y.

Construcción estructural del puente.

La estructura base del puente está hecha de aluminio, para su construcción se utilizó un perfil típico de aluminio utilizado en máquinas cnc, el diseño es más sencillo que el puente de fresado puesto que el mismo conlleva grandes esfuerzos en las tareas que cumple por lo que no es necesaria una gran rigidez, al igual que en el puente anterior este tiene una base en donde se puede empernar a los rodamientos lineales que se encuentran montados en las guías cilíndricas, la forma de este puente se muestra en la figura 17.

Figura 17. Estructura del puente de impresión 3D y corte láser



Implementación de los tornillos de bolas para el eje Z.

El diámetro de los tornillos es de 12 mm y fueron seleccionados en la sección 3.7.3, los mismos van colocados a los dos lados del puente y sirven para elevar el eje Y y los cabezales que se encuentran montados en el mismo; los tornillos van sujetos en la parte de arriba por medio de una cremallera, generando de esta manera estabilidad en el movimiento. Como se observa en la figura.

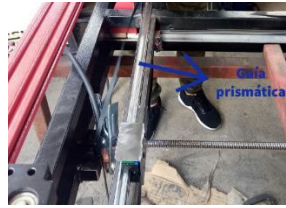
Figura 18. Implementación de los tornillos de bolas para el eje Z



Implementación de las guías prismáticas para eje Y.

La guía prismática HIWIN fue escogida en la sección 7.3.2 por su gran estabilidad y por la precisión que brinda en cada movimiento, han sido montadas sobre los tornillos de bolas que existen en cada extremo del puente formando de esta manera el eje Y, sobre estas guías van montados dos bloques deslizantes donde irán montados los cabezales de impresión 3D y corte láser, el montaje de esta se aprecia en la figura 19.

Figura 19. Implementación de las guías prismáticas eje Y



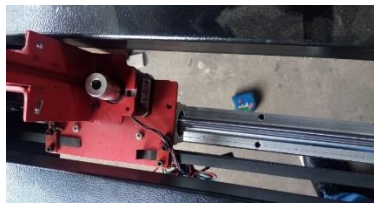
Construcción del sistema de movimiento para el eje X ,Y.

En la sección se diseñó el mecanismo de transmisión por correas para estos ejes, se seleccionó correas síncronas GT2 juntamente con poleas dentadas GT2, para el mecanismo del eje Y se colocó las poleas sobre la guía prismática y las correas van conectadas a un elemento montado sobre los bloques hiwin como se observa en la figura 20.

Figura 20. Implementación de correas síncronas para el eje Y



Figura 21. Implementación del sistema de movimiento para el eje X



Montaje de cabezales de impresión 3D y corte láser.

Los cabezales de corte láser e impresión 3D van montados sobre dos bloques deslizantes HIWIN unidos mediante una pieza de sujeción, todo esto moviéndose a través de la guía prismática del eje y. El cabezal de impresión 3D posee un motor para introducir el material de impresión en la boquilla o HOT END y un ventilador para enfriar el mismo, mientras que el cabezal laser es un módulo regulable de 40 W regulable mediante señal PWM el montaje de los mismos se muestra en la figura 22.

Figura 22. Montaje de los cabezales de impresión 3D y corte láser



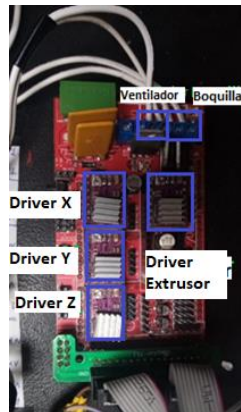


Implementación del sistema eléctrico Puente 1

Sistema eléctrico puente de impresión 3D.

El sistema eléctrico tiene como centro de operaciones la tarjeta Ramps 1.4, desde donde se controla cada uno de los elementos que se requieren para el funcionamiento de las tres aplicaciones llevadas a cabo en la máquina. En la figura 20 se representa cada uno de los elementos del puente de impresión 3D y corte láser que van conectados a la tarjeta de control. Los drivers DVR8825 escogidos en el capítulo 3, son compatibles con el microcontrolador y tienen un espacio reservado dentro de la Ramps 1.4 para la colocación de los mismos como se observa en la figura 23.

Figura 23. Implementación de drivers DVR8825 para puente de corte láser e impresión 3D



Estos drivers tienen la capacidad de mover el motor a la fracción de $1/32$ por cada paso lo que genera mayor precisión al momento de realizar los diseños propuestos, cada uno de estos drivers controla un motor en un eje específico de movimiento a excepción del eje Z el cual se compone de 2 motores, para los cuales se divide la corriente permitiendo energizar los dos con el mismo driver, se tiene también un driver para el eje del extrusor. Cada motor posee dos bobinas las cuales van dispuestas en los pines correspondientes de la Ramps 1.4.

Figura 24. Implementación de los elementos para impresión 3D y corte láser

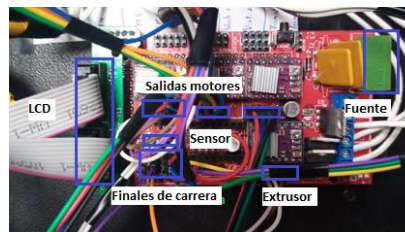
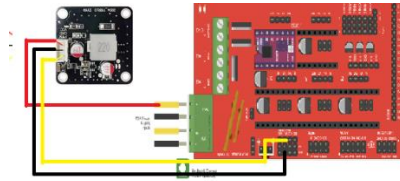
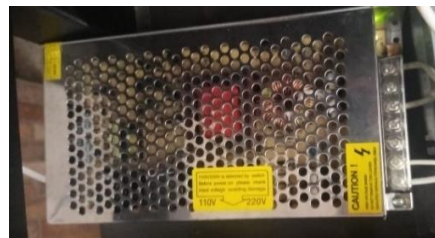
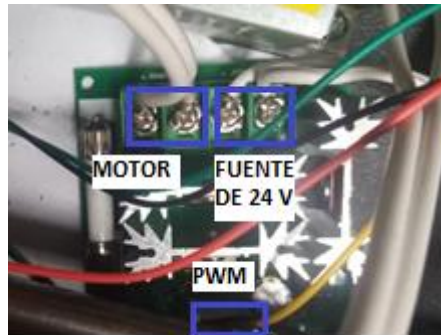


Fig. 25. Mecanismo de movimiento del eje Y

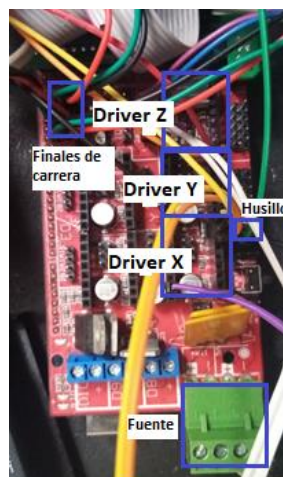
Sistema eléctrico puente de corte láser.



La conexión se la realiza utilizando el puerto D6, que posee una salida PWM, las tierras se encuentran conectadas por lo que no existe problema de usa este puerto y para energizar el láser se utiliza la entrada de 12 v de la Ramps 1.4 suministrando el poder necesario para su correcto funcionamiento.



La implementación de todos los elementos como son los drivers de los motores, los finales de carrera, el husillo de fresado y la LCD de control se muestra en la figura 40, completando de esta manera la implementación de todos los elementos en los dos puentes de trabajo los cuales se encuentran protegidos por botones de encendido, para cada puente, además se tiene un botón adicional para el encendido del láser.



Implementación del firmware Marlin

El firmware contiene un compendio de configuraciones en las que se debe tomar en cuenta las características que se desea tener en la máquina diseñada, dentro de este entorno de configuración se puede cambiar valores de drivers motores, finales de carrera, offset entre otras características que deben tener valores acordes al funcionamiento requerido por la máquina. Este firmware es de fácil manipulación y accesibilidad ya que se puede encontrar una adaptación en arduino del mismo, es decir que solo se hace necesaria la instalación de este IDE para poder configurar las funciones del firmware.

Lo primero que se define en el firmware son los drivers que se van a usar en cada uno de los ejes de la estructura en este caso para el puente 1 (figura 41 a) todos los ejes de movimiento son ejecutados mediante el driver DVR8825 y para el puente 2 (figura 41 b) los ejes X,Y son ejecutados mediante el driver TB6600 Y el eje Z con el driver DVR8825, esta configuración se la puede apreciar en la figura 27.

```
#define X_DRIVER_TYPE  DRV8825
#define Y_DRIVER_TYPE  DRV8825
#define Z_DRIVER_TYPE  DRV8825
//#define X2_DRIVER_TYPE  A4988
//#define Y2_DRIVER_TYPE  A4988
//#define Z2_DRIVER_TYPE  A4988
//#define Z3_DRIVER_TYPE  A4988
//#define Z4_DRIVER_TYPE  A4988
//#define I_DRIVER_TYPE  A4988
//#define J_DRIVER_TYPE  A4988
//#define K_DRIVER_TYPE  A4988
//#define U_DRIVER_TYPE  A4988
//#define V_DRIVER_TYPE  A4988
//#define W_DRIVER_TYPE  A4988
#define E0_DRIVER_TYPE DRV8825
```

Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

```
#define TEMP_SENSOR_0  1
#define TEMP_SENSOR_1  0
#define TEMP_SENSOR_2  0
#define TEMP_SENSOR_3  0
```

Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

El siguiente ítem es definir son los pasos en cada milímetro que se mueve los ejes de la máquina, así como las velocidades máximas que puede alcanzar, las aceleraciones y los rebotes que tiene la máquina durante el proceso de trabajo, para calcular los pasos se debe tomar en cuenta la transmisión que usa cada uno de los ejes, realizando una medición dado unos pasos determinados la relación que se mueve a consecuencia de los mismos, las velocidades se establecen dependiendo de las capacidades de los motores y la aceleración conjuntamente con el rebote se configuran mediante pruebas que permitan identificar los valores correctos para que el movimiento sea suave y adecuado. Los valores establecidos son los que se muestran en la figura 28.



```
*/  
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 40, 40, 1600, 185.23 }  
  
/**  
 * Default Max Feed Rate (linear=mm/s, rotational=°/s)  
 * Override with M203  
 * X, Y, Z [, I [, J [, K...]]  
 */  
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 80, 80, 1, 8 }  
  
//#define LIMITED_MAX_FR_EDITING // Limit edit via M203 or  
#if ENABLED(LIMITED_MAX_FR_EDITING)  
#define MAX_FEEDRATE_EDIT_VALUES { 600, 600, 10, 50 } // ...  
#endif  
  
/**  
 * Default Max Acceleration (speed change with time) (linear=mm/(  
 * (Maximum start speed for accelerated moves)  
 * Override with M201  
 * X, Y, Z [, I [, J [, K...]]  
 */  
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 1000, 1000, 35, 3000 }  
  
//#define LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING // Limit edit via M201 or  
#if ENABLED(LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING)  
#define MAX_ACCEL_EDIT_VALUES { 6000, 6000, 200, 20000 }  
#endif
```

Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

```
*/  
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 320, 640, 400, 500 }  
  
/**  
 * Default Max Feed Rate (linear=mm/s, rotational=°/s)  
 * Override with M203  
 * X, Y, Z [, I [, J [, K...]]], E  
 */  
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 100, 100, 5, 25 }  
  
//#define LIMITED_MAX_FR_EDITING // Limit edit via M203 or LCD t  
#if ENABLED(LIMITED_MAX_FR_EDITING)  
#define MAX_FEEDRATE_EDIT_VALUES { 600, 600, 10, 50 } // ...or, se  
#endif  
  
/**  
 * Default Max Acceleration (speed change with time) (linear=mm/(s^2),  
 * (Maximum start speed for accelerated moves)  
 * Override with M201  
 * X, Y, Z [, I [, J [, K...]]], E  
 */  
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 500, 500, 100, 10000 }  
  
//#define LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING // Limit edit via M201 or LCD t  
#if ENABLED(LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING)  
#define MAX_ACCEL_EDIT_VALUES { 6000, 6000, 200, 20000 } // ...  
#endif
```

Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

Otro aspecto a configurar son los finales de carrera, los cuales se puede utilizar en dos configuraciones normalmente abierto o normalmente cerrado, se puede verificar mediante el uso del código M119, el cual da un reporte del estado de los finales de carrera, si se encuentran activos sin estar accionando se debe cambiar la configuración de los mismos en el firmware, para el caso establecido la lógica que se le ha dado es el mostrado en la figura 44 a para el puente 1 y figura 44 b para el puente 2.



```
* Spindle & Laser control
*
* Add the M3, M4, and M5 commands to turn the spindle/laser on and off, and
* to set spindle speed, spindle direction, and laser power.
*
* SuperPid is a router/spindle speed controller used in the CNC milling community.
* Marlin can be used to turn the spindle on and off. It can also be used to set
* the spindle speed from 5,000 to 30,000 RPM.
*
* You'll need to select a pin for the ON/OFF function and optionally choose a 0-5V
* hardware PWM pin for the speed control and a pin for the rotation direction.
*
* See https://marlinfw.org/docs/configuration/2.0.9/laser_spindle.html for more config details.
*/
#define SPINDLE_FEATURE
// #define LASER_FEATURE
#if EITHER(SPINDLE_FEATURE, LASER_FEATURE)
  #define SPINDLE_LASER_ACTIVE_STATE LOW // Set to "HIGH" if SPINDLE_LASER_ENA_PIN is active

  #define SPINDLE_LASER_USE_PWM // Enable if your controller supports setting the s
  #if ENABLED(SPINDLE_LASER_USE_PWM)
    #define SPINDLE_LASER_PWM_INVERT false // Set to "true" if the speed/power goes up when yo
    #define SPINDLE_LASER_FREQUENCY 2500 // (Hz) Spindle/laser frequency (only on supported
    // ESP32: If SPINDLE_LASER_PWM_PIN is onboard then
    // the frequency determines the PWM resolution. 25
    // (250000 / SPINDLE_LASER_FREQUENCY) = max value.
  #endif
#endif
```

Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

Para activar el láser o husillo mediante código G marlin incorpora los comandos M3 S y M5, mediante los cuales se enciende el láser o husillo listo para ser usado, siendo la S un valor entre 0 y 255 dependiendo de la potencia a la que requiera grabar, y para el husillo un valor entre 5000 y 12000 revoluciones que es el valor permitido por la herramienta usada.

Interfaz de Marlin y Pronterface

Marlin posee una interfaz de control con algunas de las funciones más importantes, desde donde se puede monitorear todo el sistema que posee la máquina, temperatura, avance de impresión o corte láser, posicionamiento en los ejes X, Y y Z, ventiladores y otras características todo esto hace posible que el operario se familiarice más con el entorno de trabajo al ser capaz de monitorear el proceso.

En su pantalla principal (figura 46 a) se muestra un extrusor con la temperatura que se encuentra en ese momento, en el instante en que se decida calentar la boquilla esta temperatura irá en aumento hasta el punto que se haya dispuesto, posee un icono de ventilador el cual recre la potencia a la que está trabajando el mismo, tiene una barra de coordenadas para indicar la posición del instrumento en ese momento preciso, se encuentran los tres ejes de movimientos y también la posición del extrusor. La pantalla en ambos casos es la misma con la única diferencia que la del puente 2 siempre mantiene su temperatura en 25 grados centígrados (figura 46 b) grados debido a la configuración realizada en el firmware.



Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

Para el control desde computadora se dispone de un programa de gran accesibilidad y facilidad de uso, en donde se puede mover los ejes en la disposición que se requiera, se puede también accionar el extrusor y establecer un monitoreo de temperatura para la boquilla del extrusor, se pueden imponer las velocidades a las cuales se desea mover los ejes de la máquina, también posee una barra de comandos desde la cual se puede enviar código G interpretable por el firmware del sistema, para poder realizar trabajos bien sea de impresión corte láser o fresado se puede cargar programas completos en código G, pausarlos y resetearlos según las necesidades del usuario.

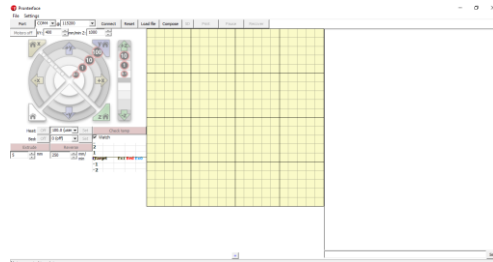


Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

4. Pruebas y resultados

Pruebas de indicación y repetición

Para las pruebas mecánicas de movimiento a realizarse se ha utilizado la norma ISO 10362-2 2009, la cual provee pruebas de aceptación para máquinas de medición por coordenadas cartesianas (CMM), las mediciones se las debe realizar mediante el uso de un reloj comparados midiendo diferentes distancias programadas con más de 2 repeticiones para de esta forma obtener el error de medición y que tanta repetibilidad posee la máquina. Se tomará como muestra 5 diferentes longitudes en posiciones determinadas de los ejes de movimientos, teniendo como muestra total 75 medidas que darán un resultado confiable de la precisión y repetición que posee la estructura. Se han tomado 2 posiciones en el eje Y, 2 en el eje X y una en el eje Z para cada uno de los puentes puesto que ambos poseen diferente sistema de movimiento y es independiente el uno del otro por lo que el error encontrado también será diferente.

La distancia máxima de recorrido en los ejes X, Y es de 600 mm y de 250 mm en el eje Z, esto para el puente de corte láser e impresión 3D mientras que para el puente de fresado es igual en los ejes X, Y, en el eje Z sin embargo el recorrido máximo es de 150 mm.



Los datos de las mediciones se han organizado en una tabla en donde se tiene las mediciones ideales de la máquina y en las otras columnas se tiene las mediciones reales que se han ejecutado, se puede observar la tabla 26 para el puente de corte láser e impresión 3D y en la tabla 27 para el puente de fresado, para determinar los errores se tiene la variable de error de medición de longitud (EL) que es la diferencia entre la medida idealizada y la medida real que muestra el reloj comparador, se tiene también la variable de repetibilidad (RO), la cual es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de las medidas reales realizadas y finalmente se tiene el error máximo permitido (MEP) que es el valor máximo de error arrojado por la estructura.



PUENTE 1								
EJES	Posición	Medida	Medida Real 1	Mediada Real 2	Medida Real 3	EL1	EL2	EL3
X	1	600	599,98	599,99	600,01	-0,02	-0,01	0,01
		300	299,97	299,99	299,98	-0,03	-0,01	-0,02
		150	149,98	149,96	149,98	-0,02	-0,04	-0,02
		100	99,99	99,99	99,99	-0,01	-0,01	-0,01
		50	49,99	49,99	50,02	-0,01	-0,01	0,02
	2	600	599,98	599,99	599,98	-0,02	-0,01	-0,02
		300	299,99	299,98	299,99	-0,01	-0,02	-0,01
		150	149,99	149,99	149,97	-0,01	-0,01	-0,03
		100	99,99	100	100	-0,01	0	0
		50	49,99	49,98	50	-0,01	-0,02	0
Y	3	600	600,02	600,02	600,01	0,02	0,02	0,01
		300	299,99	300	300	-0,01	0	0
		150	150,01	150	149,99	0,01	0	-0,01
		100	99,99	100	100,01	-0,01	0	0,01
		50	50	50	50	0	0	0
	4	600	599,98	600	600	-0,02	0	0
		300	299,97	299,98	299,9	-0,03	-0,02	-0,1
		150	150,01	150,01	150	0,01	0,01	0
		100	99,97	99,99	99,98	-0,03	-0,01	-0,02
		50	49,98	49,97	49,97	-0,02	-0,03	-0,03
Z	5	250	249,96	249,95	249,98	-0,04	-0,05	-0,02
		100	100,01	99,96	99,96	0,01	-0,04	-0,04
		25	25,01	25,03	25,01	0,01	0,03	0,01

Análisis de los movimientos en los ejes del puente 1

Se ha utilizado un reloj comparador fijado a la estructura de la máquina, para medir la precisión y repetibilidad de la misma como se especifica en la norma ISO 10360-2, los datos se han presentado en la sección anterior, ahora se procede a analizar estos datos para descubrir los valores de error que posee la estructura en cada uno de sus ejes.

Pruebas de corte y grabado láser

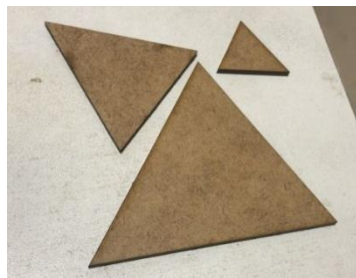


Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y

ERRORES EN CORTE LÁSER EN TRIANGULOS			
Tamaños	Medida real 1	Medida real 2	Medida real 3
25x25	24,08X24,9	24,7X24,9	24,75X24,85



50x50	49,65X49,7	49,85X49,75	49,7X49,75
75x75	74,6X74,75	74,8X74,7	74,7X74,75

Corte	Porcentaje de error	Corte Válido
Cuadrado	0.8%	NO
Cuadrado	0.8%	NO
Cuadrado	0.6%	SI
Cuadrado	0.3%	SI
Cuadrado	0.6%	SI
Cuadrado	0.53%	SI
Cuadrado	0.4%	SI
Cuadrado	0.33%	SI
Cuadrado	0.33%	SI
Círculo	0.6%	SI
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.8%	NO
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.5%	SI
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.33%	SI
Círculo	0.46%	SI
Triángulo	0.8%	NO
Triángulo	1.2%	NO
Triángulo	1%	NO
Triángulo	0.7%	SI
Triángulo	0.5%	SI
Triángulo	0.4%	SI
Triángulo	0.53%	SI
Triángulo	0.4%	SI
Triángulo	0.4%	SI

Pruebas de impresión 3D

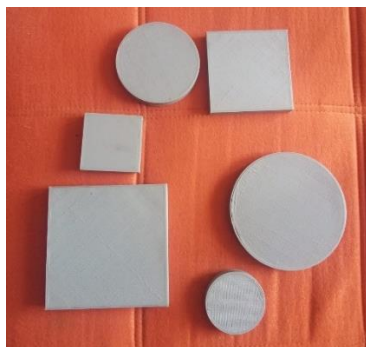


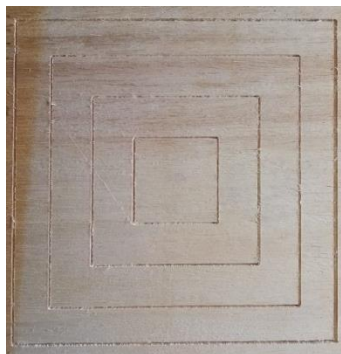
Fig. 3. Mecanismo de movimiento del eje Y



ERRORES EN IMPRESIÓN 3D EN CUBOS			
Tamaños	Medida real 1	Medida real 2	Medida real 3
25X25	25,4x25,55	25,45x25,55	25,3x25,35
50X50	50,5x50,6	50,6x50,5	50,4x50,2
75X75	75,7x75,75	75,75x75,65	75,6x75,25

Corte	Porcentaje de error	Corte Válido
Cuadrado	2.2%	NO
Cuadrado	2.2%	NO
Cuadrado	1.4%	NO
Cuadrado	1.2%	NO
Cuadrado	1.2%	NO
Cuadrado	1.1%	NO
Cuadrado	0.8%	NO
Cuadrado	0.85%	NO
Cuadrado	0.86%	NO
Círculo	1.2%	NO
Círculo	1.4%	NO
Círculo	1.4%	NO
Círculo	1.2%	NO
Círculo	0.9%	SI
Círculo	1.1%	NO
Círculo	0.8%	SI
Círculo	0.86%	SI
Círculo	0.86%	SI
Triángulo	1%	NO
Triángulo	1.4%	NO
Triángulo	1.6%	NO
Triángulo	1.2%	NO
Triángulo	0.9%	SI
Triángulo	0.8%	SI
Triángulo	0.8%	SI
Triángulo	0.8%	SI
Triángulo	0.86%	SI

Pruebas de tallado en madera





ERRORES DE TALLADO EN MADERA PARA CUADROS			
Tamaños	Medida real 1	Medida real 2	Medida real 3
50x50	50,4x49,9	50,4x50,1	50,45x50,2
100x100	100,65x99,8	100,5x100,6	100,45x100,55
150x150	150,7x150,5	150,65x150,6	150,6x150,45

Corte	Porcentaje de error	Corte Válido
Cuadrado	0.8%	NO
Cuadrado	0.8%	NO
Cuadrado	0.9%	NO
Cuadrado	0.65%	SI
Cuadrado	0.60%	SI
Cuadrado	0.55%	SI
Cuadrado	0.46%	SI
Cuadrado	0.43%	SI
Cuadrado	0.4%	SI
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.6%	SI
Círculo	0.6%	SI
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.55%	SI
Círculo	0.4%	SI
Círculo	0.466%	SI
Círculo	0.433%	SI
Círculo	0.466%	SI
Triángulo	1%	NO
Triángulo	0.6%	SI
Triángulo	0.5%	SI
Triángulo	0.45%	SI
Triángulo	0.55%	SI
Triángulo	0.55%	SI
Triángulo	0.4%	SI
Triángulo	0.5%	SI
Triángulo	0.46%	SI

5. Conclusión

Se diseñó e implementó un sistema mecatrónico aplicado a la manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado con un error en corte láser máximo de 0.4 mm, en impresión 3D de 0.65 mm y en tallado de 0.75 mm.

El análisis de coste-beneficio da como resultado la gran ventaja que posee la estructura implementada en cuanto a volumen de trabajo en sus tres aplicaciones, pero más importante es la reducción de un 68% en el costo de implementación y 66.6% en promedio de volumen con respecto a máquinas de características similares comerciales, pero existe una reducción considerable en cuanto a la precisión.



Los desplazamientos máximos en los ejes X, Y son de 600 mm con un avance de 1300 mm/min, 200 mm para el eje Z del puente de corte láser e impresión 3D con un avance de 200 mm/min y 150 mm para el puente de fresado con un avance de 600 mm/min.

Aplicando la norma ISO 10360-2 para pruebas en máquinas cartesianas, se encontró una precisión de 0.05 mm y una repetibilidad de 0.05 mm.

En el puente de corte láser e impresión 3D se ha colocado un solo cabezal con la herramienta de impresión y corte láser, por lo que para el uso de cada uno de ellos se debe declarar el offset correspondiente respecto al final de carrera que para el cabezal de impresión es de 30 mm y para el de corte láser es de 60 mm.

Referencias Bibliográficas

- ALL3DP. (26 de Mayo de 2021). Las mejores impresoras 3D de gran formato de 2021. Obtenido de ALL3DP: [https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjv69PozNfzAhXMQzABHSmVAhoQFnoECB8QAQ&url=https%3A%2F%2fall3dp.com%2Fes%2F1%2Fmejor-impresora-3d-gran-formato%2F&usq=AOvVawOWMgPmyweyWvq_NMYb9kWM](https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjv69PozNfzAhXMQzABHSmVAhoQFnoECB8QAQ&url=https%3A%2F%2Fall3dp.com%2Fes%2F1%2Fmejor-impresora-3d-gran-formato%2F&usq=AOvVawOWMgPmyweyWvq_NMYb9kWM)
- Andrea LLerena, M. C. (10 de Mayo de 2014). Dspace ESPOCH. Obtenido de Dspace ESPOCH: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3534/1/108TO095.pdf>
- Bermejo, F. (22 de Junio de 2020). TMFB. Obtenido de TMFB: <https://tmolduras-fbermejo.es>
- Bricolaje, O. (24 de Abril de 2022). Tableros MDF. Obtenido de Tableron MDF: <https://www.maderaydecoracion.com/tableros/tableros-mdf>
- Bustillos Diego, C. K. (2014). Diseño y construcción de un prototipo de centro de mecanizado vertical CNC de 5 ejes para el laboratorio CNC. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Caicedo Damian, P. C. (2018). Diseño e implementacion de una maquina Router CNC de 4 ejes para el tallado de modelos 3D en madera. Quito, Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Canchignia, M. (2019). Diseño e implementacion de un intercambiador de efectores finales . Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Carlos Lugmania, W. V. (2015). Diseño y construccion de un prototipo de cortadora por laser de diosido de carbono con control numérico computarizado. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Castiglione, N. V. (2017). Sistemas de transmisión de routers CNC. Revista letreros, 4.
- CNC, F. (09 de Noviembre de 2021). Fisher CNC. Obtenido de Transmisión del movimiento CNC: <https://sites.google.com/site/fischercncyelectronica/que-hace-un-reuter-cnc/que-se-debe-tener-en-cuenta-para-comprar-un-reuter/sistema-de-guiado/transmision-del-movimiento>
- Creality. (10 de Agosto de 2021). Impresora 3D CP-01. Obtenido de Impresora 3D CP-01: <https://www.creality.com/es/goods-detail/cp-01-3d-printer>
- Createc, 3. (29 de Octubre de 2016). RAMPS 1.4. Obtenido de RAMPS 1.4: <https://createc3d.com/es/comprar-electronica-impresora-3d/156-ramps-14.html>
- Factory, G. (25 de Noviembre de 2019). Factory, Geek. Obtenido de Polea dentada GT2: <https://www.geekfactory.mx/tienda/robotica/piezas-para-cnc-e-impresoras-3d/polea-dentada-gt2-20-dientes-5mm-barreno/>



Geek, E. (25 de Mayo de 2020). Tutorial del TB6600. Obtenido de Tutorial del TB6600:
<https://www.electrogeekshop.com/tutorial-del-tb6600-driver-de-motor-paso-a-paso-con-arduino/>

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses relacionados con este estudio y que todos los procedimientos seguidos cumplen con los estándares éticos establecidos por la revista. Asimismo, confirman que este trabajo es inédito y no ha sido publicado, ni parcial ni totalmente, en ninguna otra publicación.