



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO MULTIFUNCIONAL APLICADO A MANUFACTURA ADITIVA Y SUSTRACTIVA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA EL LABORATORIO CNC DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE SEDE LATACUNGA.RIESGO

AUTORES: ESPÍN ROSALES, JONATHAN ANTONIO RODRIGUEZ PURUNCAJA, JASON ALEXANDER

DIRECTOR: ING. ACUÑA COELLO FAUSTO VINICIO

LATACUNGA

2023



Contenido General



Antecedentes

Manufactura aditiva

La manufactura aditiva involucra tecnologías que funden el material, utiliza la técnica inversa a la fabricación sustractiva: la pieza se obtiene mediante la sobre posición o apilamiento de numerosas capas de material hasta conformar el prototipo definitivo, completamente funcional (UNED, 2016).

Manufactura sustractiva

La fabricación sustractiva es el método más recurrente, sobre todo, al trabajar con materiales como el metal o la madera. Y puede realizarse de forma manual, o bien por medio del mecanizado por control numérico computarizado, es decir, el mecanizado CNC, siendo esta última opción la más eficiente (MECASINC, 2015)



Objetivos

Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema mecatrónico multifuncional aplicado a la manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado.

Objetivo Específicos

- Investigar sobre el desarrollo de máquinas multifuncionales dentro de la industria manufacturera tanto en el ámbito local como en el ámbito internacional
- Identificar las necesidades del laboratorio CNC en relación a las áreas de aplicación que se requiera implementar.
- Diseñar la estructura mecánica, el sistema de distribución de cabezales y el circuito eléctrico que de soporte a la máquina a partir del uso de diferentes softwares de apoyo.
- Implementar la estructura mecánica y circuitería eléctrica de la máquina, además de un sistema de distribución para alternar el uso de los cabezales de corte laser, impresión 3D y tallado.



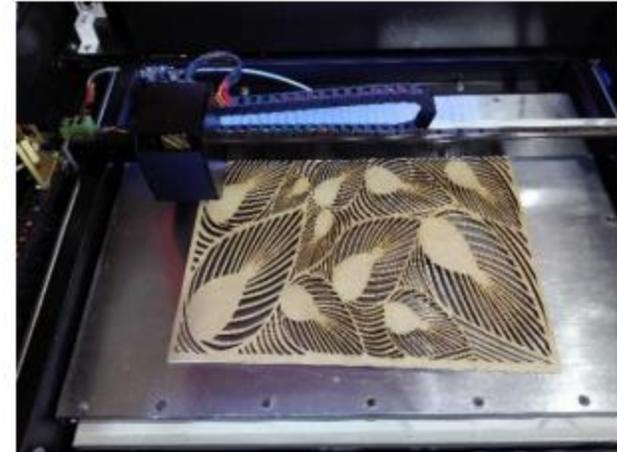
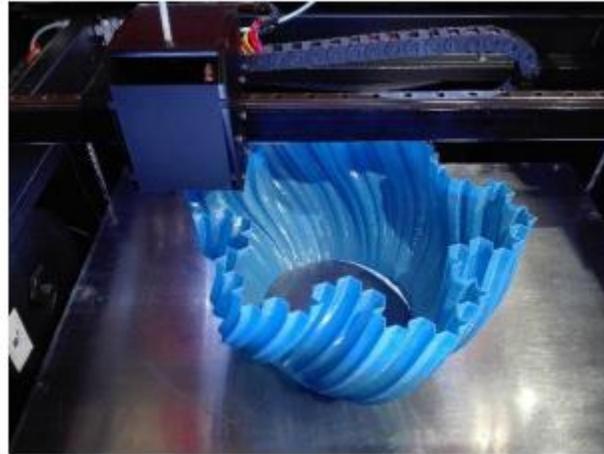
Hipótesis

¿El diseño e implementación de un sistema mecatrónico multifuncional permitirá realizar trabajos de manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado?



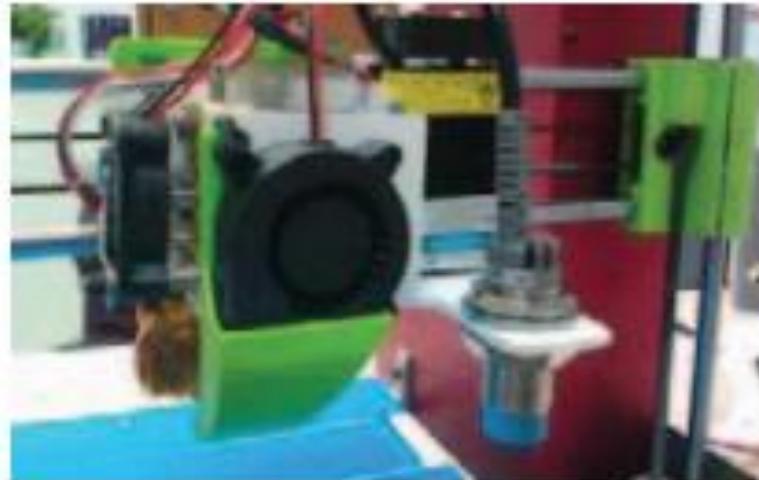
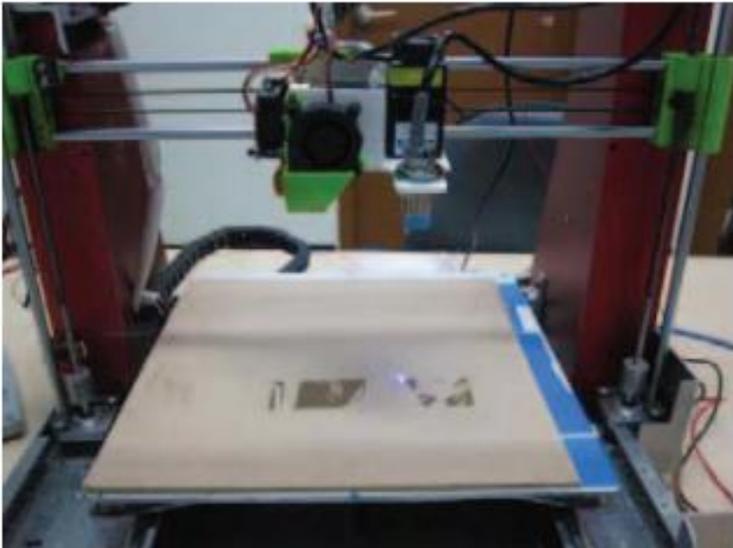
Estado del Arte

Diseño e implementación de un módulo intercambiador de efectores finales, impresora 3d, plotter, grabador láser para la empresa FABCAD S.A– SAIS 3D, Marcos Canchigna, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, julio 2019.



Estado del Arte

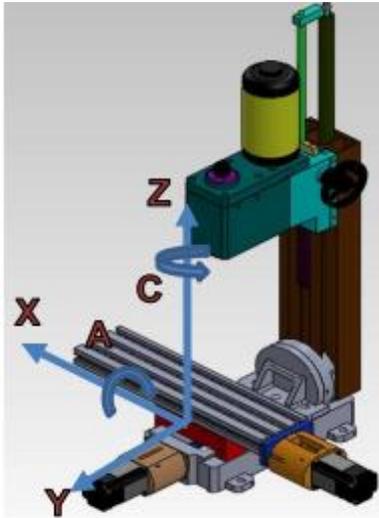
Desarrollo de un sistema integrado de impresora 3D y tallado láser, Cheng-Tiao Hsieh, Departamento de Diseño Industrial, Universidad Tecnológica de Ming Chi, 2016.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Estado del Arte

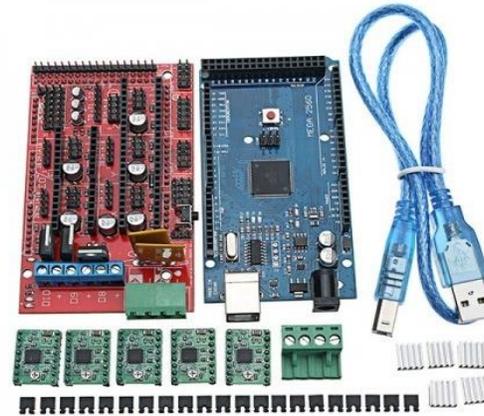
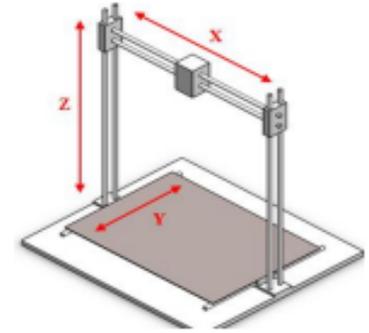
Línea base del laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Selección de alternativas

- Armazón y sistema de movimiento: Forza 4
- Tipo de mesa de corte: Panel de abejas
- Guías de movimiento lineal: Sistema lineal con recirculación de rodillos
- Transmisión de movimiento: Transmisión mediante husillo de bolas
- Actuadores: Motores a pasos
- Tarjeta de control: Ramps 1,4 y Arduino Mega
- Firmware de control: Marlin
- Cabezal de impresión: MK8

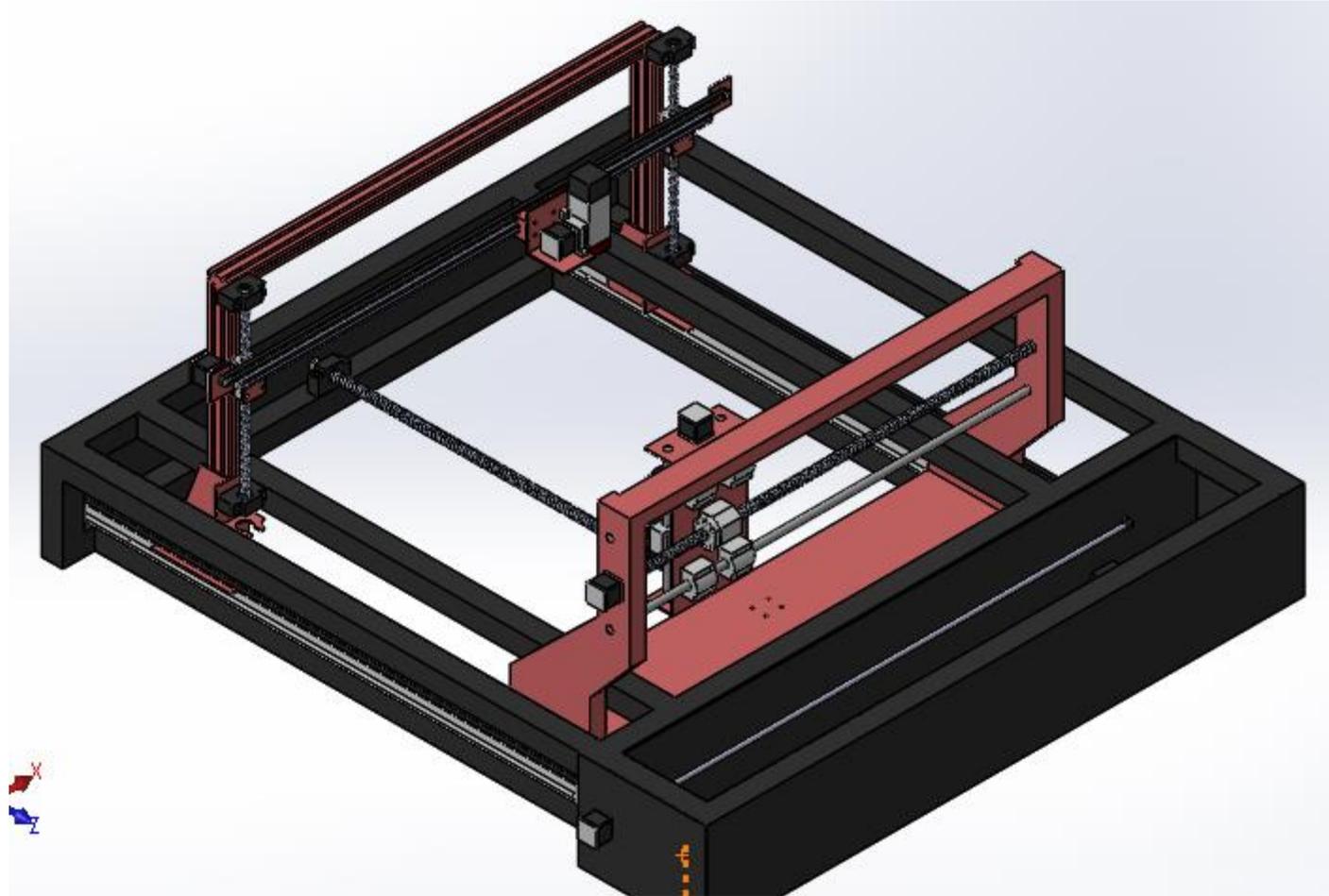


Parámetros de diseño

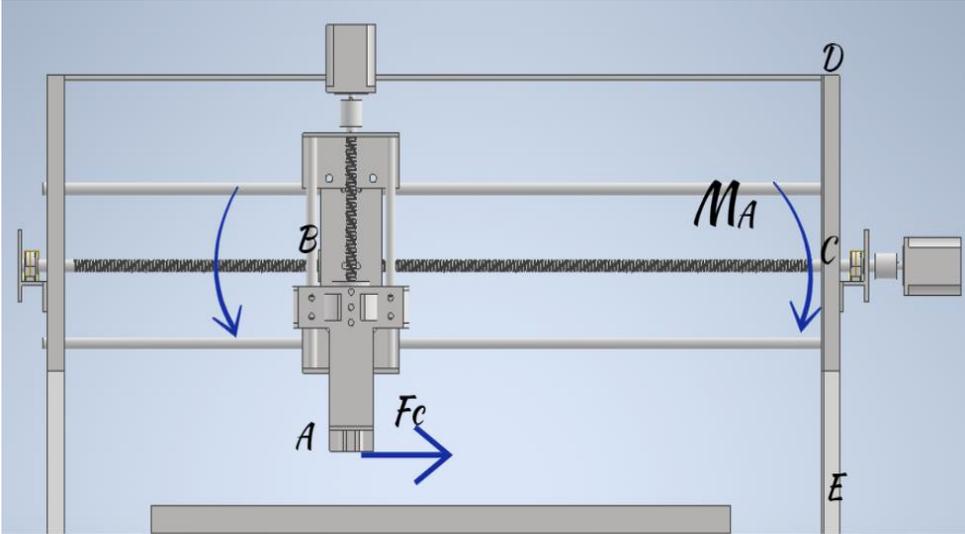
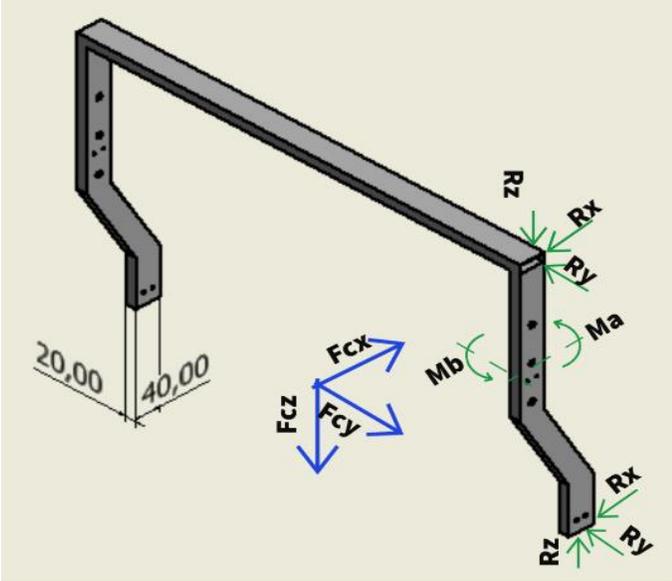
- Volumen de trabajo: 600x600x200 mm
- Tamaño estimado de la máquina: 1200 mm x 1500 mm
- Velocidad máxima de corte láser: 20 mm/seg
- Velocidad máxima de grabado láser: 400 mm/seg
- Velocidad de corte para fresado: 600 mm/min
- Fuerza específica de corte: $K_c=600 \text{ N/mm}^2$
- Fuerza de corte: $F_c:180 \text{ N}$
- Material de impresión: PLA, ABS
- Temperatura de extrusión: 240 grados Celsius



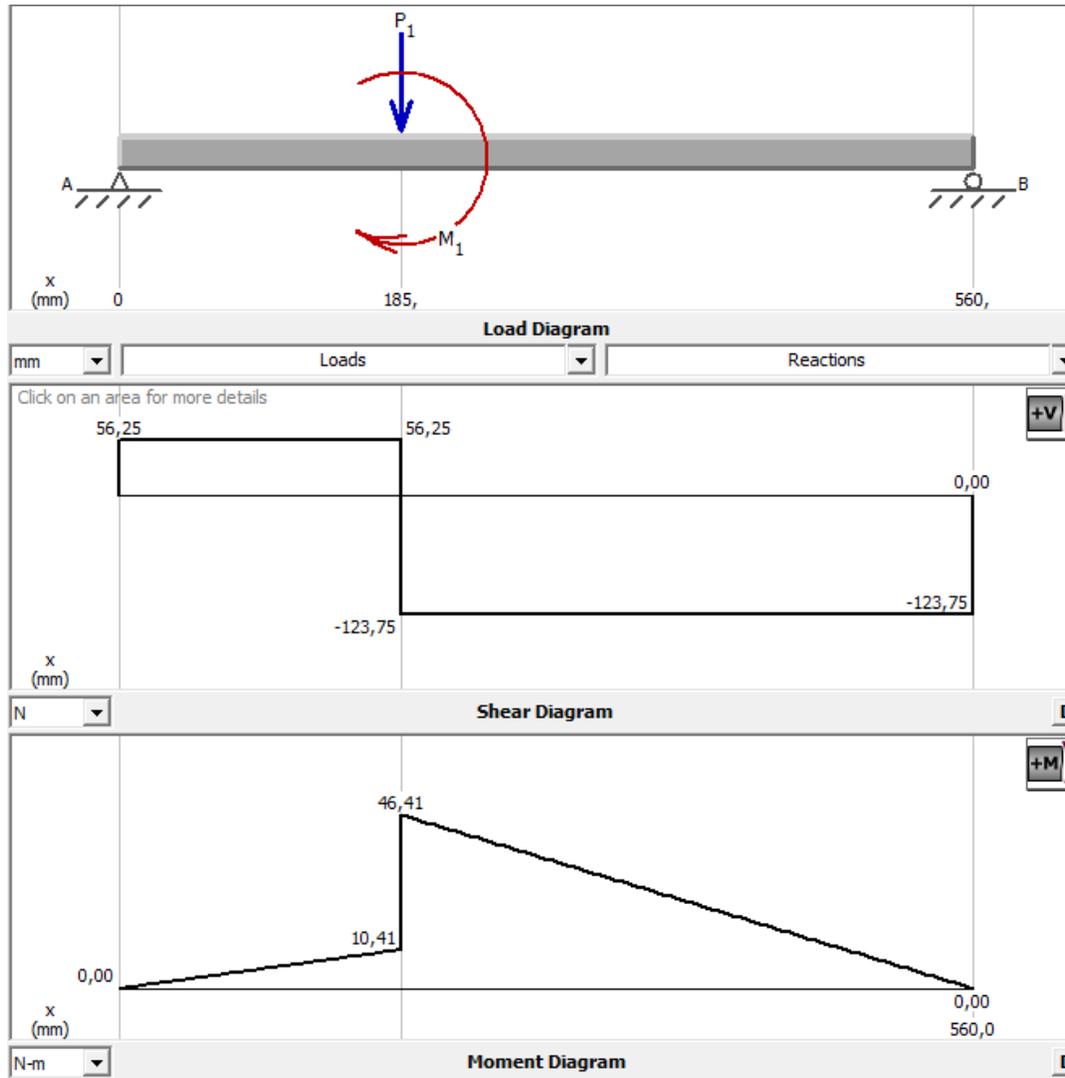
Diseño CAD



Diseño de puente transversal para fresado



Diseño de puente transversal para fresado



$$R_{Dy} = 56.21 \text{ N y } R_{Ey} = 123.75 \text{ N}$$

$$M_{DE} = 46.41 \text{ Nm}$$

$$\sigma_d = \frac{250 \text{ MPa}}{2} = 125 \text{ MPa}$$

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

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

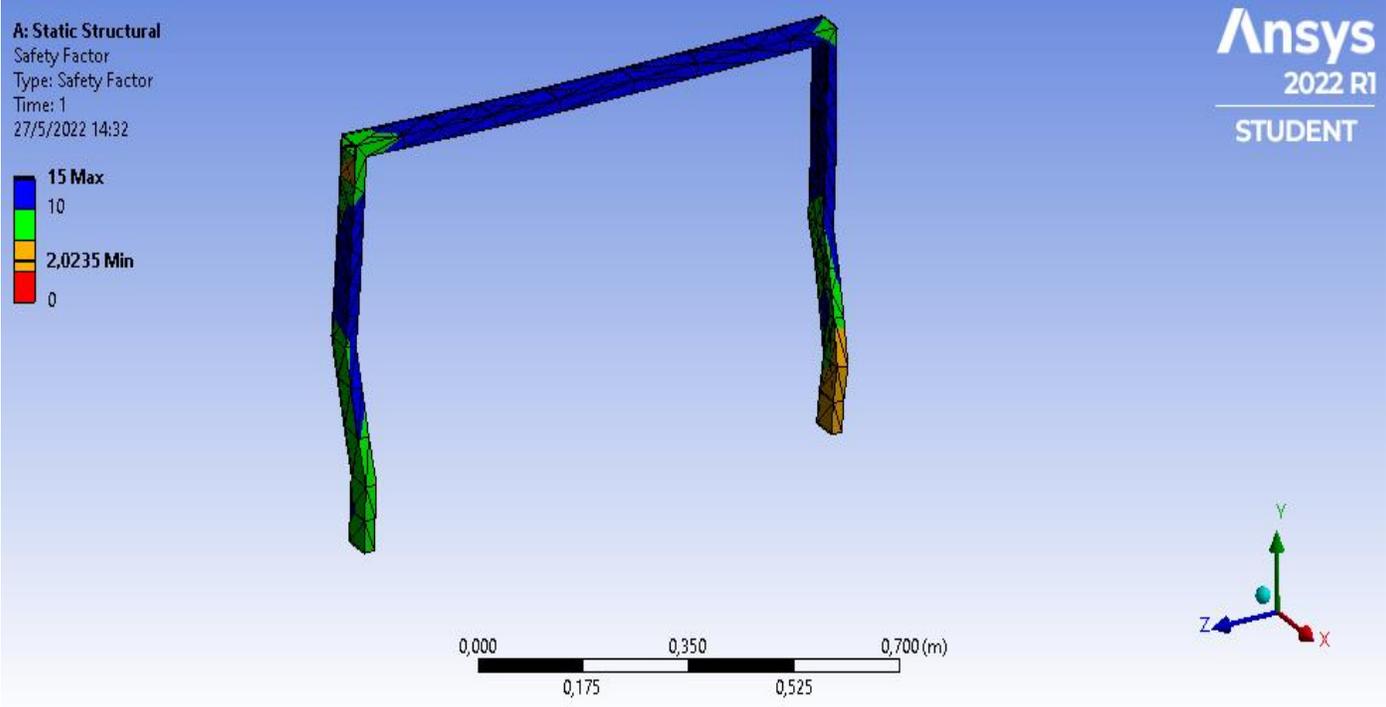
$$I = \frac{(40 \text{ mm}) * (20 \text{ mm})^3}{12} - \frac{(40 \text{ mm} - 2e) - (20 \text{ mm} - 2e)^3}{12}$$

$$e = 0.6 \text{ mm}$$

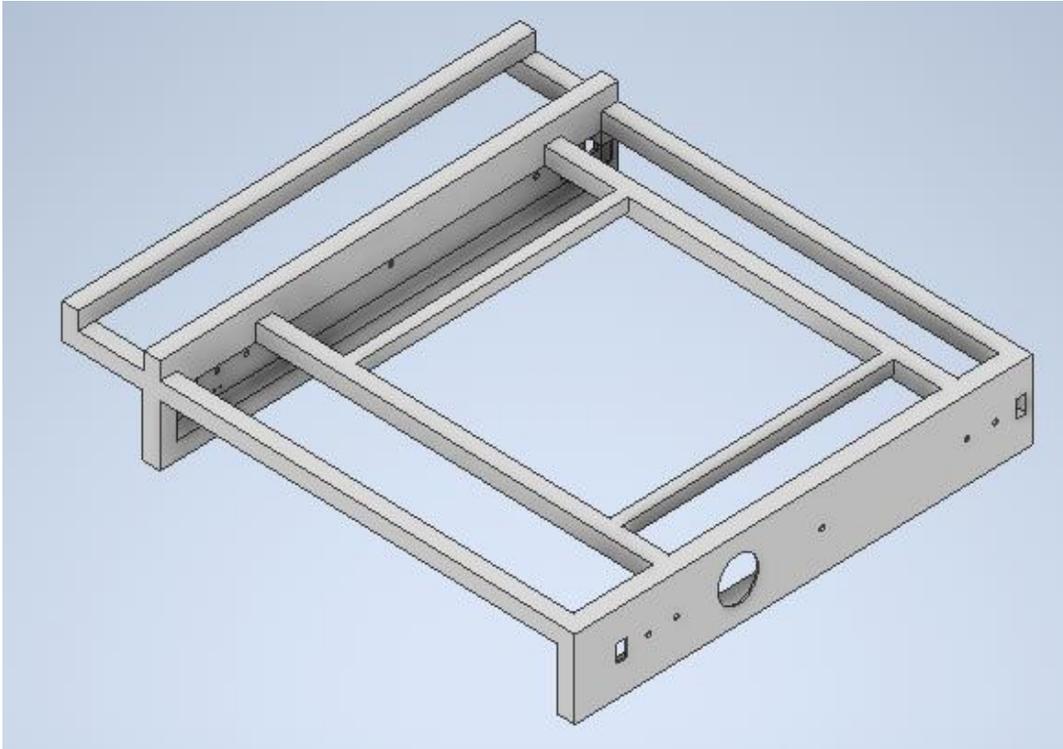


Diseño de puente transversal para fresado

Análisis CAE



Diseño de la base estructural



$$Wt = 774.2 N + 180 N = 954.2 N$$

$$\frac{I}{c} = \frac{231393 Nmm}{125 MPa}$$

$$\frac{I}{c} = 1851.14 mm^3$$

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

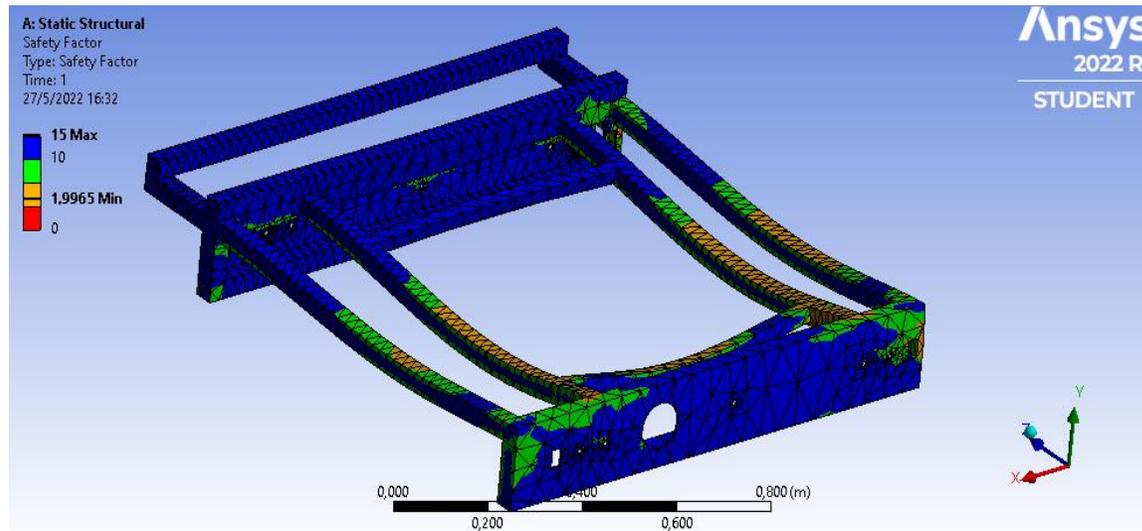
$$16e^4 + 1280e^3 - 38400e^2 - 512000e + 444273.6 = 0$$

$$h = 0.93 mm$$



Diseño de estructura base

Análisis CAE



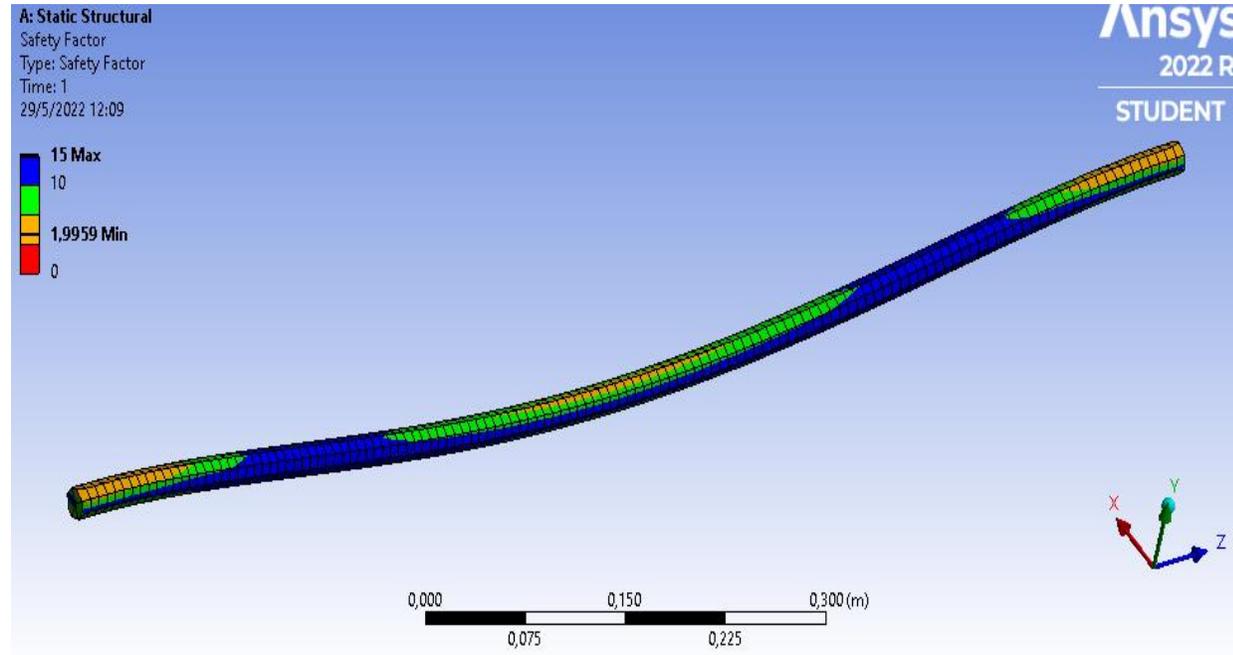
Diseño de guías lineales

$$\sigma_D = \frac{M * c}{I}$$

$$\sigma_D = \frac{M * r}{\frac{1}{4} * \pi * r^4}$$

$$r = \left(\frac{4 * M}{\pi * \sigma_{DE}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r1 = 9.08 \text{ mm} \approx D1 = 18.16 \text{ mm}$$



Selección de husillo de bolas

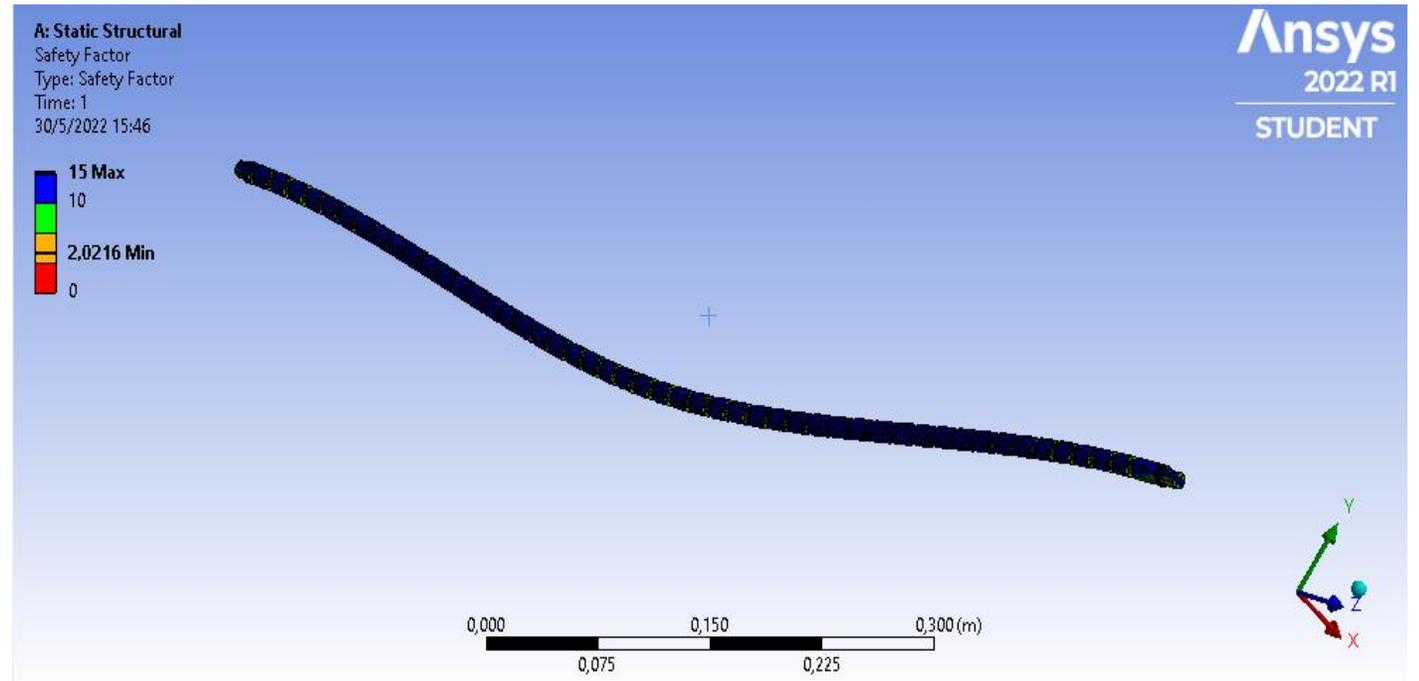
$$F_T = Wt + Fc$$

$$F = \left(40 \text{ kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) + (180 \text{ N})$$

$$F = 572 \text{ N}$$

$$A = F / \sigma_d$$

$$A = 4.57 \text{ mm}^2 \approx 0.007 \text{ pulg}^2$$



Torque para motor eje X

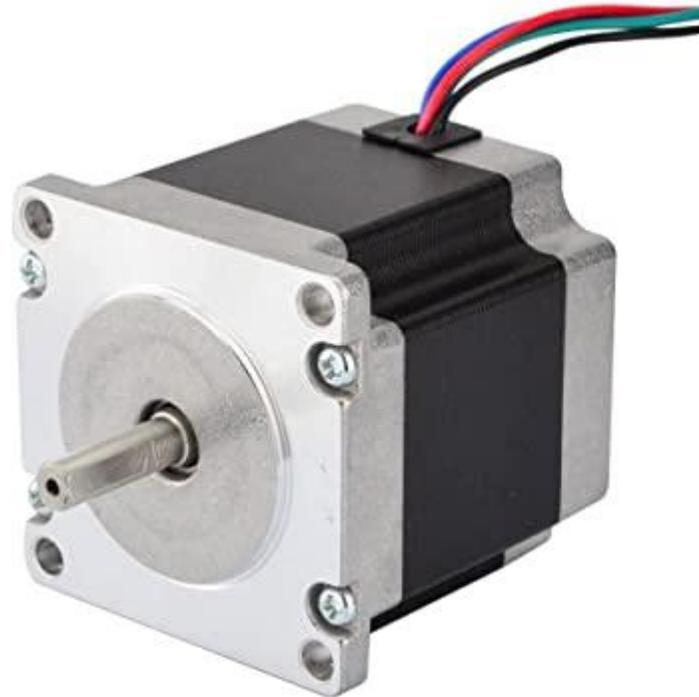
$$Dp = d - \frac{p}{2}$$

$$Dp = 13.5 \text{ mm}$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{5 \text{ mm}}{\pi * 13.5 \text{ mm}} \right) = 6.72^\circ$$

$$Tu = \frac{FDp}{2} \left[\frac{(\cos \phi \tan \lambda + f)}{\cos \phi - f \tan \lambda} \right]$$

$$Tu = 1195 \text{ N mm} \approx 1.1 \text{ N m}$$



Diseño de eje Y

$$r1 = 7.23 \text{ mm} \approx D1 = 14.46 \text{ mm}$$

$$A = 2.61 \text{ mm}^2 \approx 0.004 \text{ pulg}^2$$

$$Tu = 542.4 \text{ N mm} \approx 0.54 \text{ N m}$$

Diseño de eje Z

$$r1 = 3.74 \text{ mm} \approx D1 = 7.49 \text{ mm}$$

$$d_{\text{min tallado}} = 0.0035 \text{ m} \approx 3.5 \text{ mm}$$

$$d_{\text{min impresion}} = 0.0035 \text{ m} \approx 3.5 \text{ mm}$$

$$Tuf = 382 \text{ N mm} \approx 0.38 \text{ N m}$$

$$Tui = 269.6 \text{ N mm} \approx 0.26 \text{ N m}$$



Diseño de motor para correas

$$F = N * \left(\frac{v^2}{2 * d * g} + fr \right)$$

$$F = 55.82 \text{ N}$$

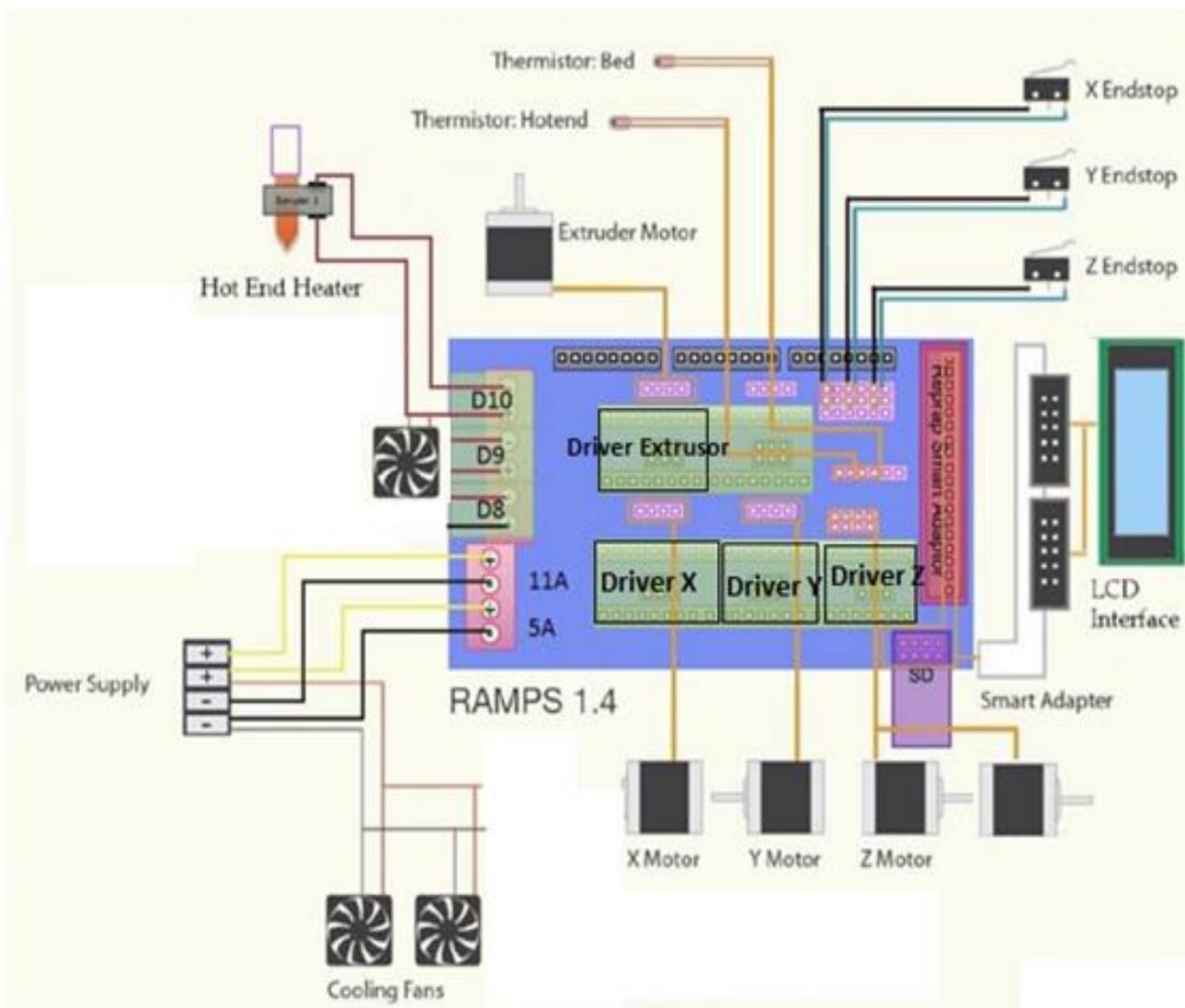
$$T = F * r$$

$$r = \frac{27 \text{ mm}}{2} = 13.5 \text{ mm}$$

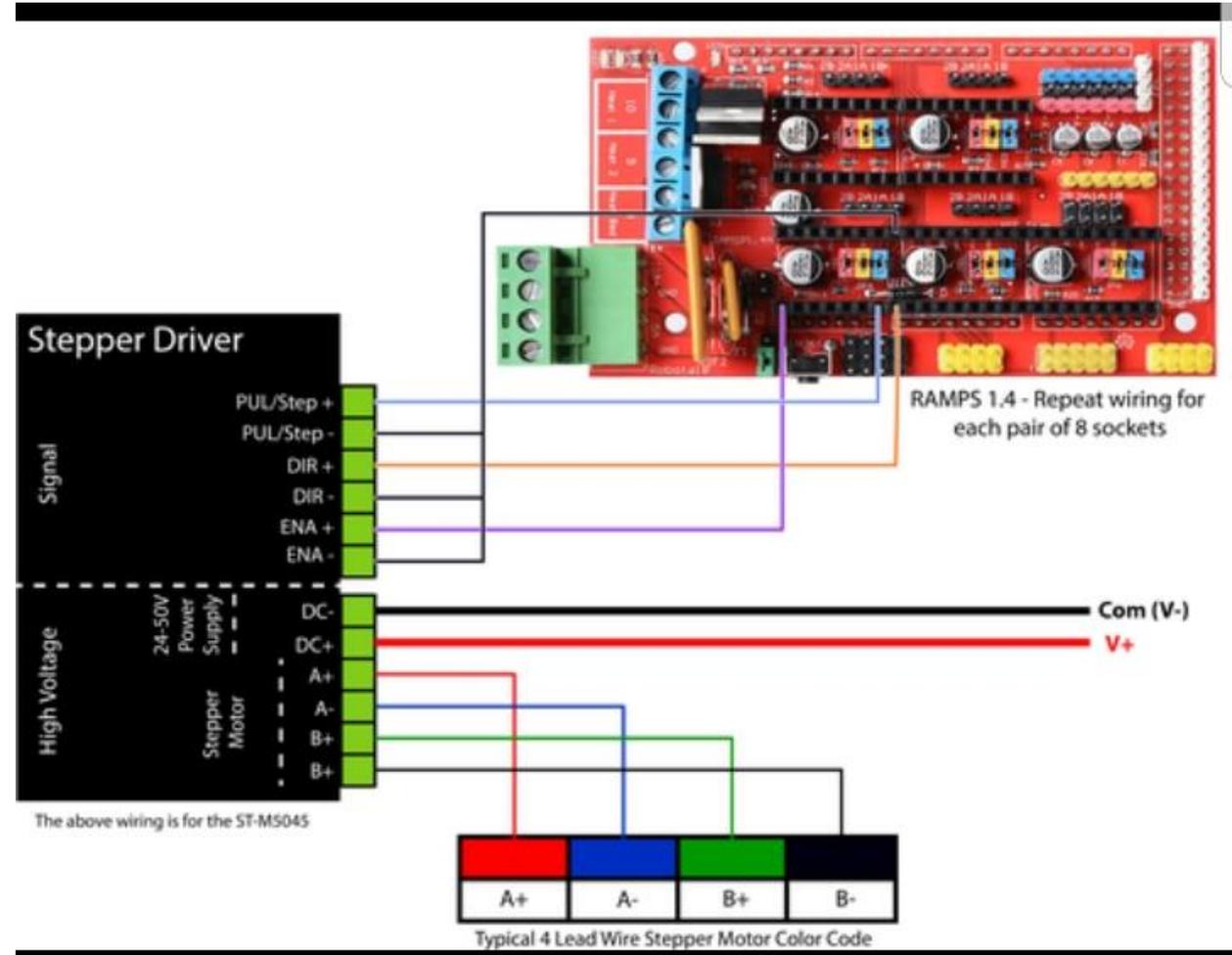
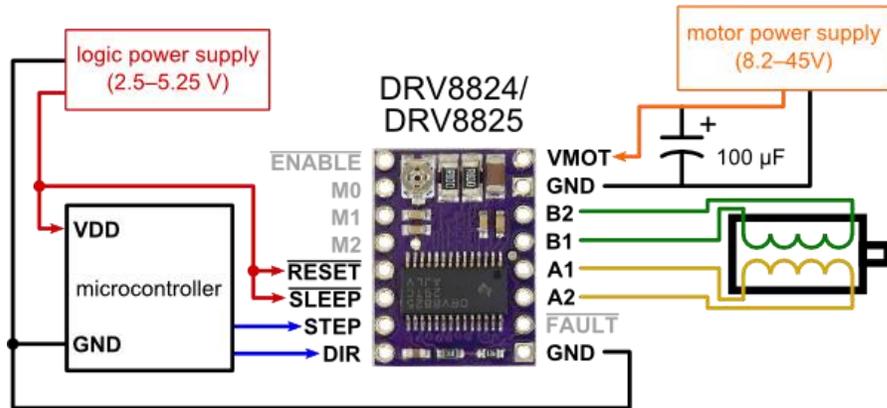
$$T = 753 \text{ N mm} \approx 0.75 \text{ Nm}$$



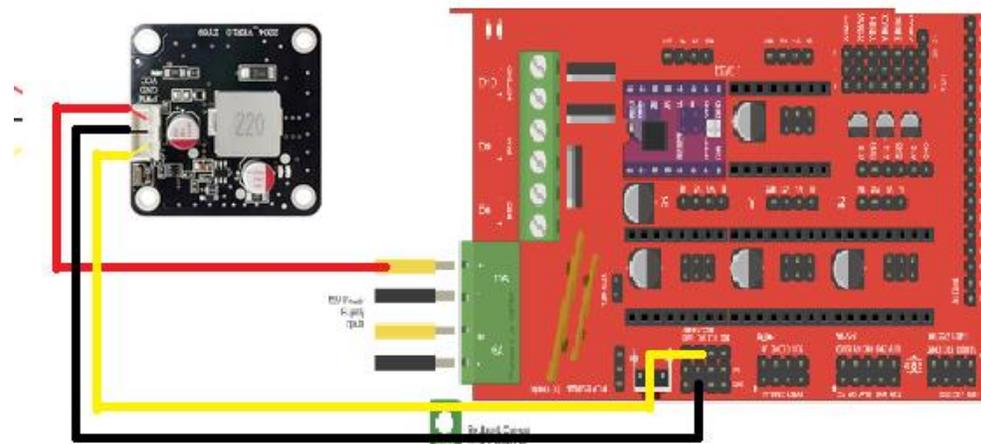
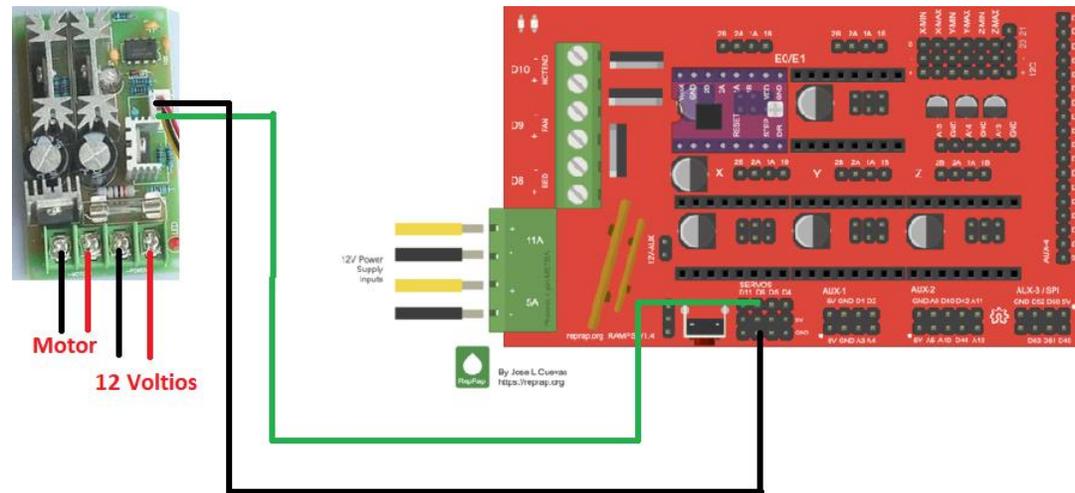
Diagrama de conexión



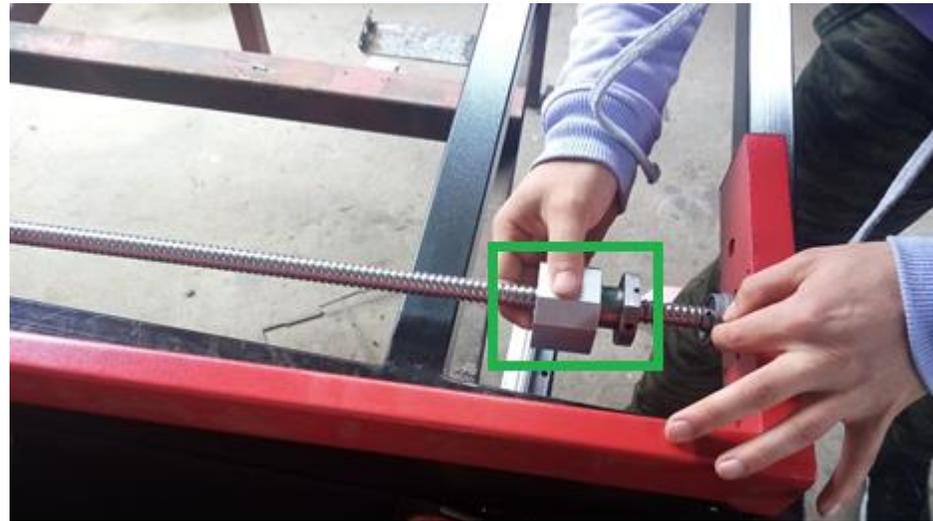
Drivers



Conexión de driver husillo y láser



Implementación

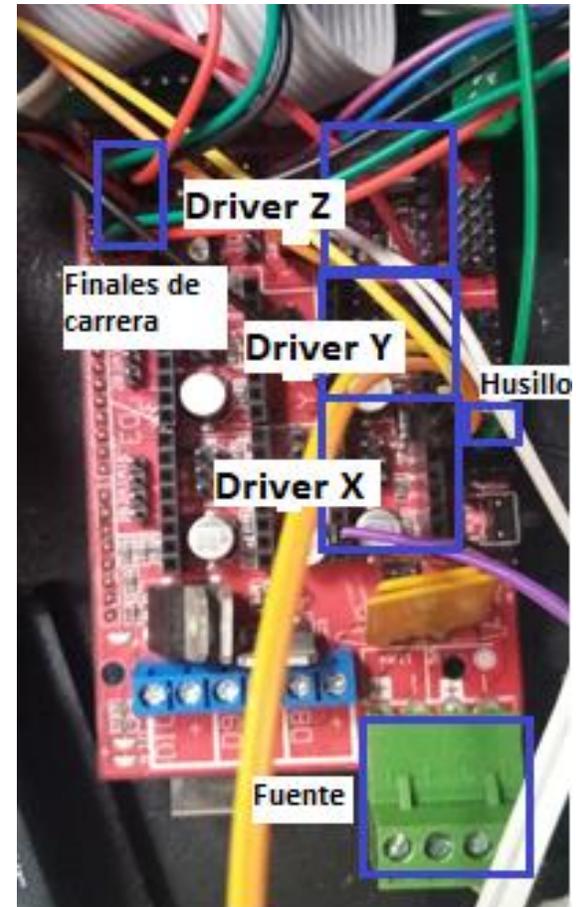
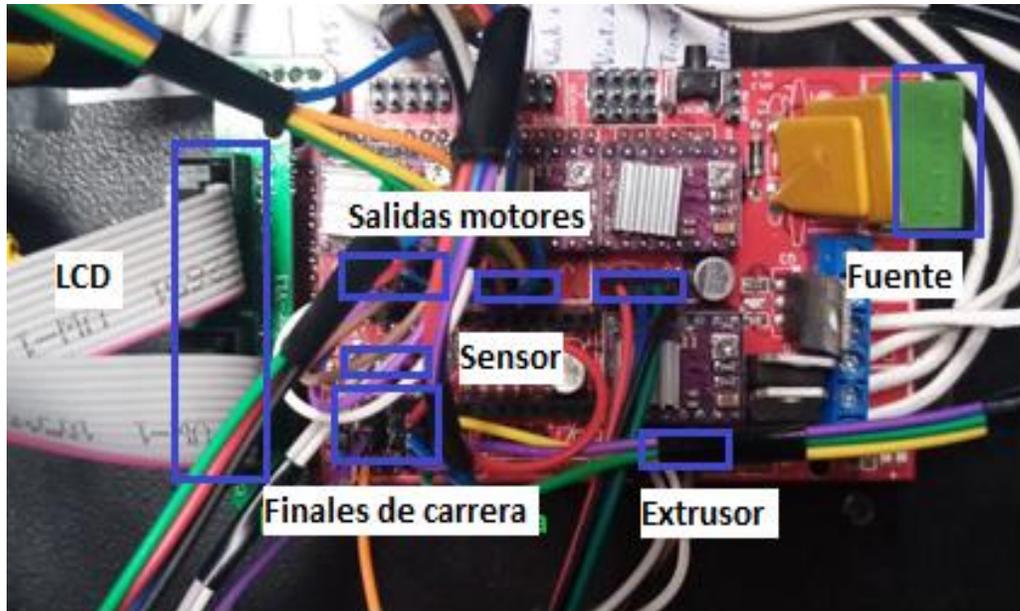


Implementación



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Implementación eléctrica



Implementación firmware

```
*/
#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/(s²), rotational=°/s²)
 * (Maximum start speed for accelerated moves)
 * Override with M201
 *
 * X, Y, Z [, I [, J [, K...]]
 */
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 1000, 1000, 35, 3000 }

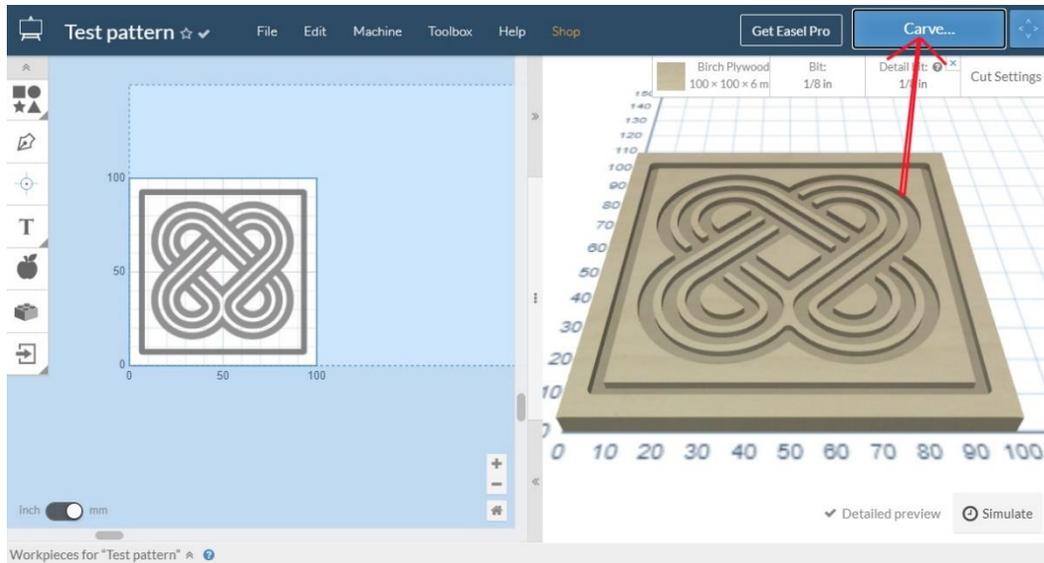
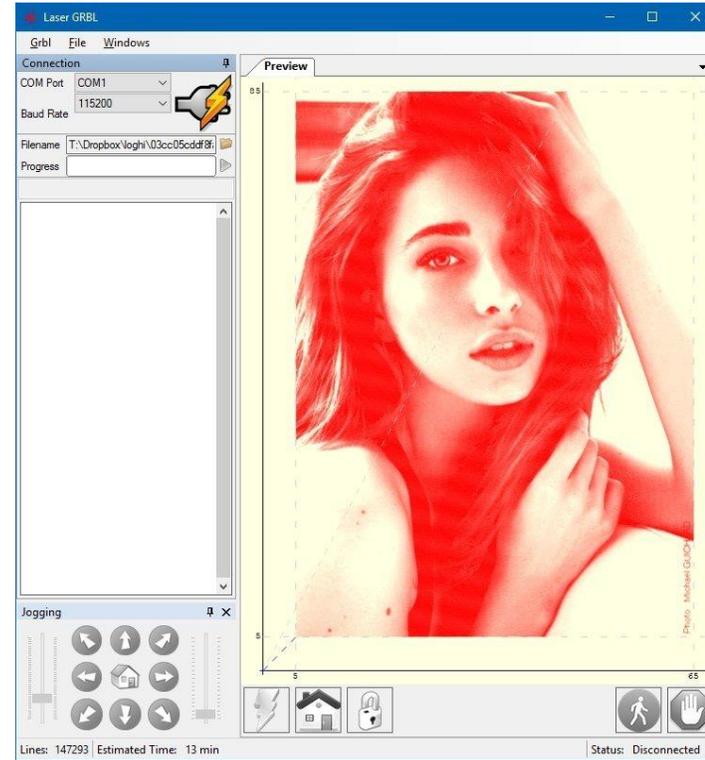
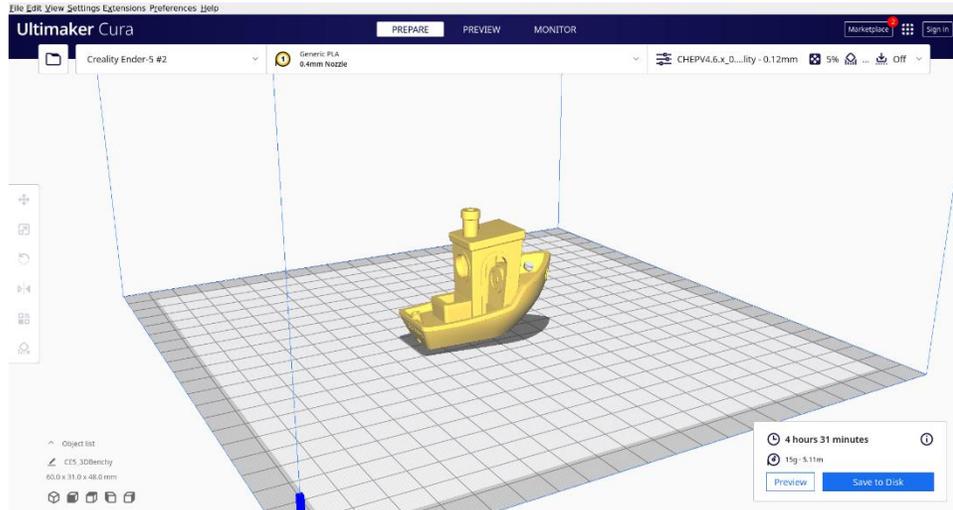
// #define LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING // Limit edit via M201 or
#if ENABLED(LIMITED_MAX_ACCEL_EDITING)
  #define MAX_ACCEL_EDIT_VALUES { 6000, 6000, 200, 20000 } // ...
#endif
```

```
* 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

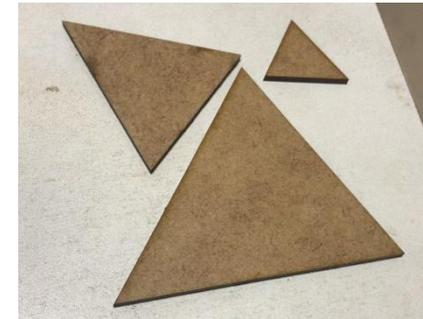
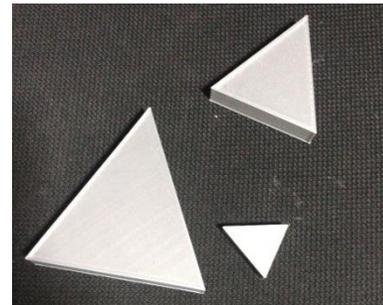
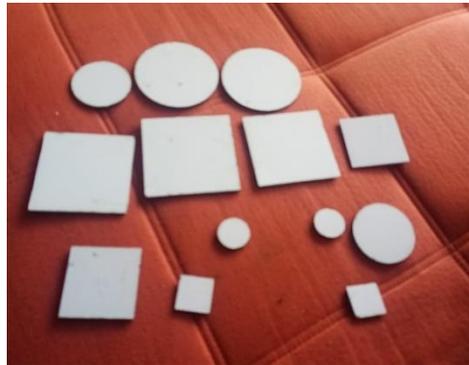
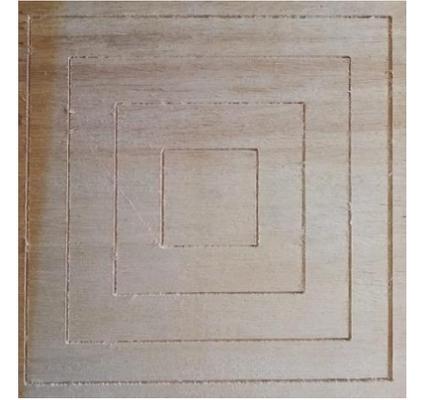
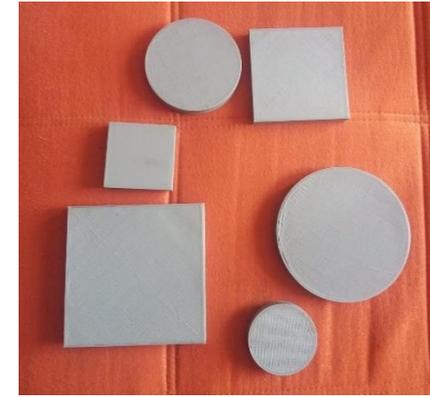
  #define SPINDLE_LASER_USE_PWM // Enable if your controller supports setting the s
  #if ENABLED(SPINDLE_LASER_USE_PWM)
    #define SPINDLE_LASER_PWM_INVERT false // Set to "true" if the speed/power goes up when yo
    #define SPINDLE_LASER_FREQUENCY 2500 // (Hz) Spindle/laser frequency (only on supported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



Software de código G

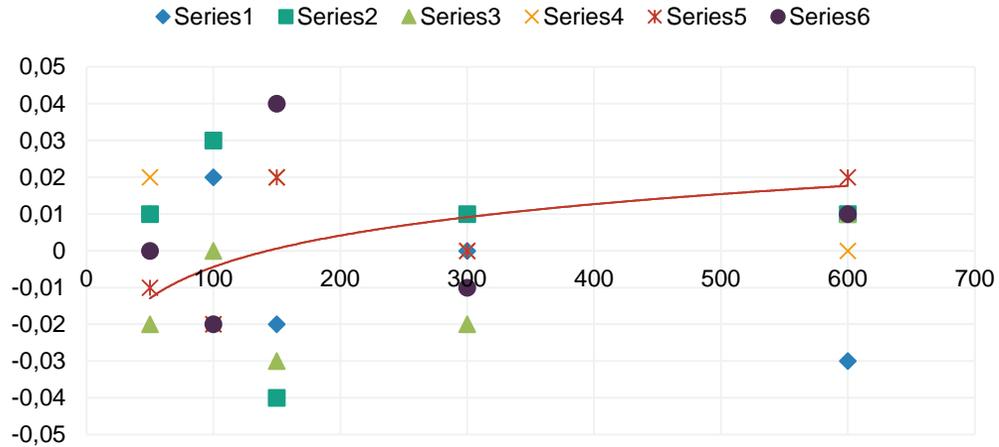


Pruebas

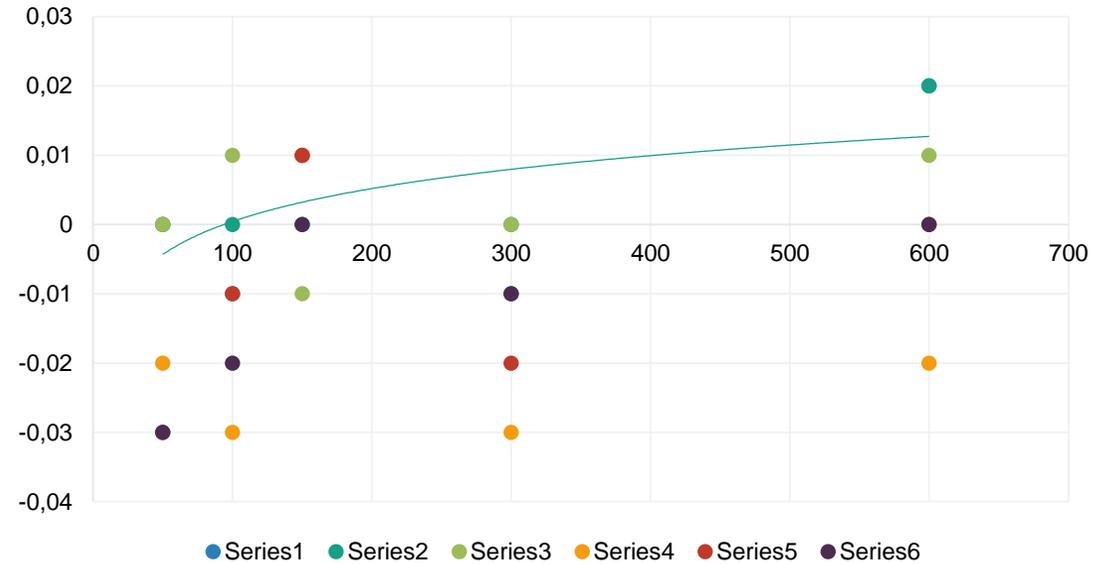


Gráfica de pruebas puente 1

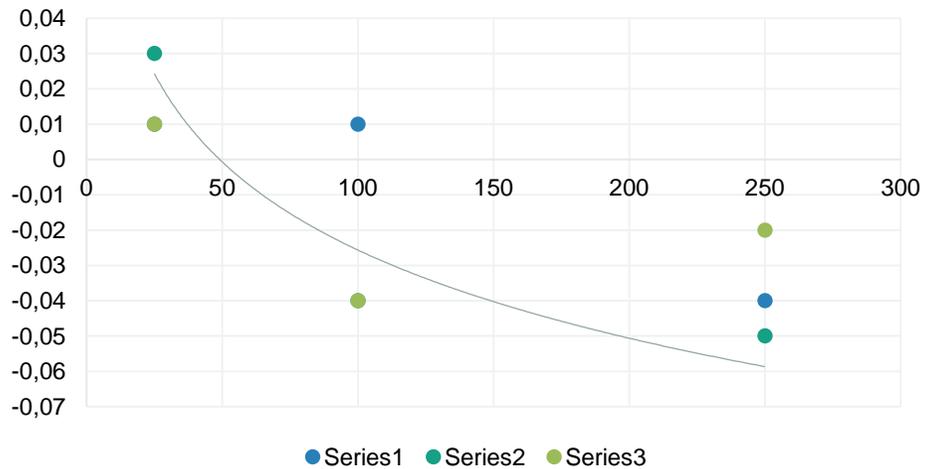
ERRORES EN EL EJE X



ERRORES EN EL EJE Y

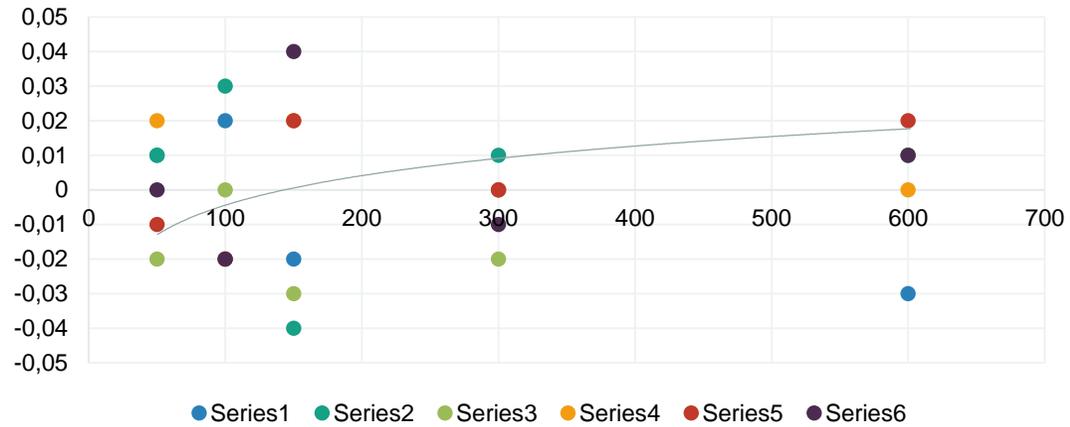


ERRORES EN EL EJE Z

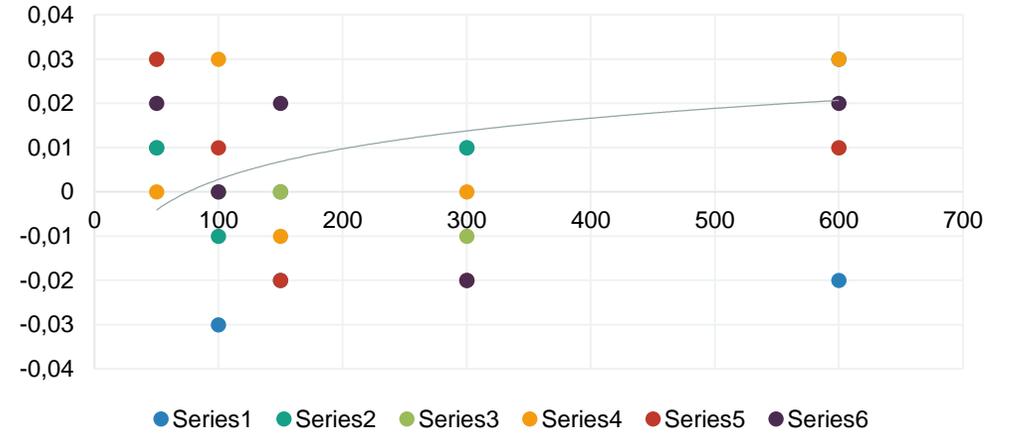


Grafica de pruebas puente 2

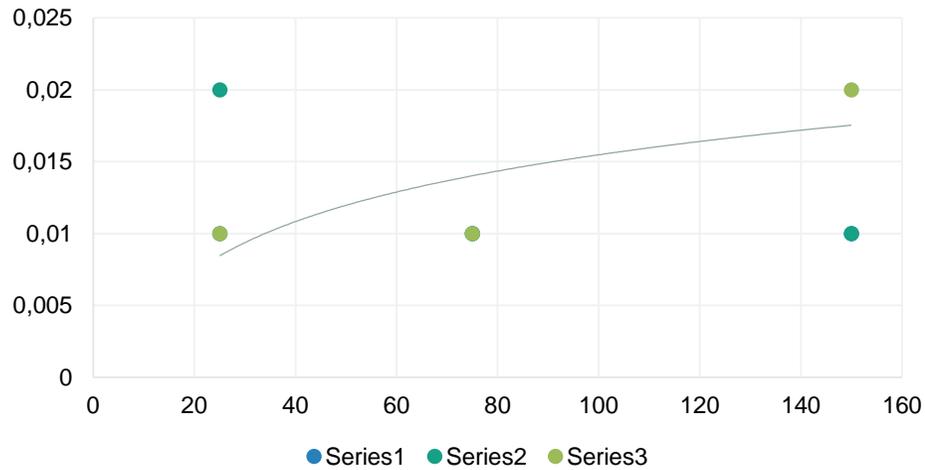
ERRORES EN EL EJE X



ERRORES EN EL EJE Y

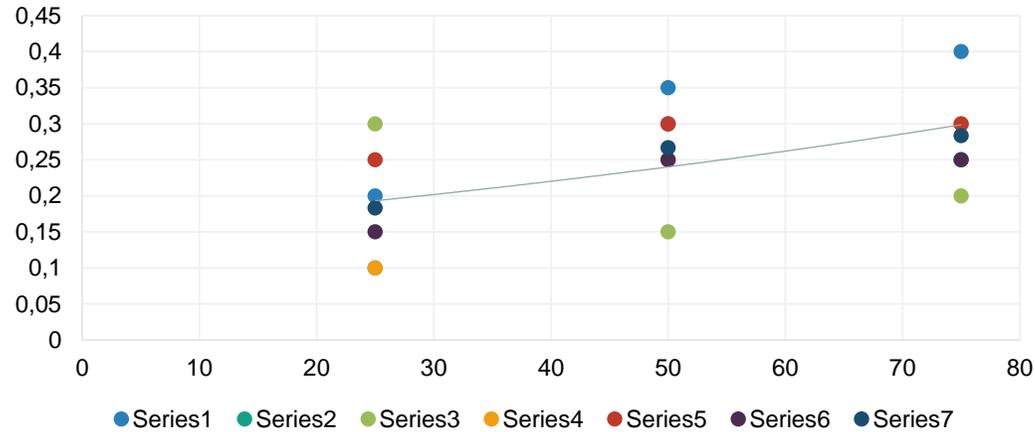


ERRORES EN EL EJE Z

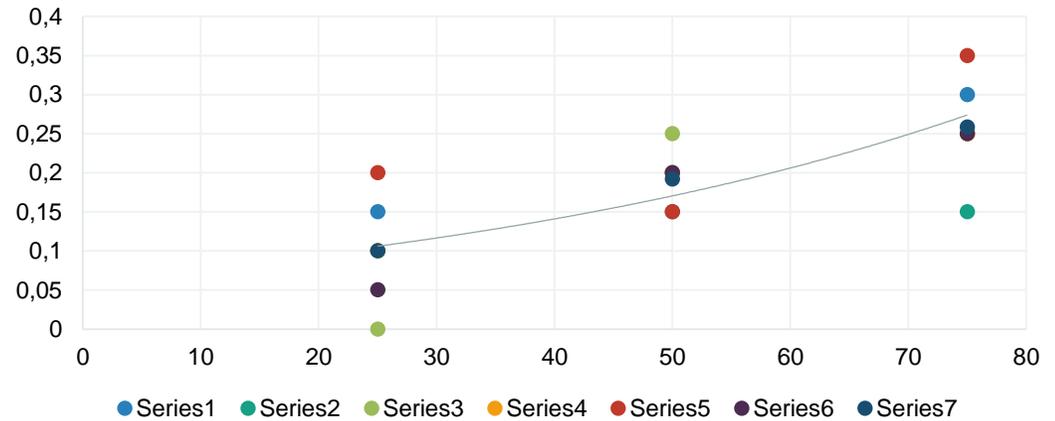


Grafica de pruebas en corte láser

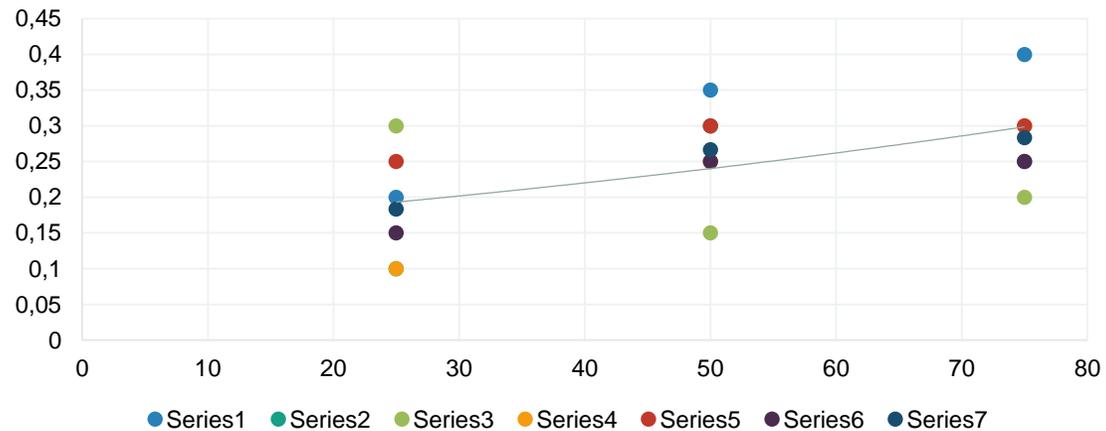
ERRORES EN CORTE LÁSER PARA CUADROS



ERRORES EN CORTE LÁSER PARA CÍRCULOS

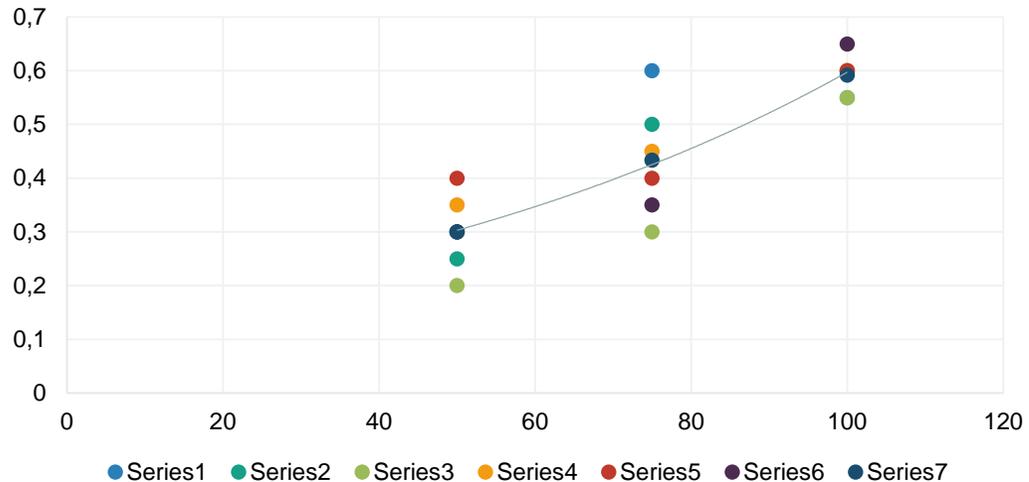


ERRORES EN CORTE LÁSER PARA TRIÁNGULOS

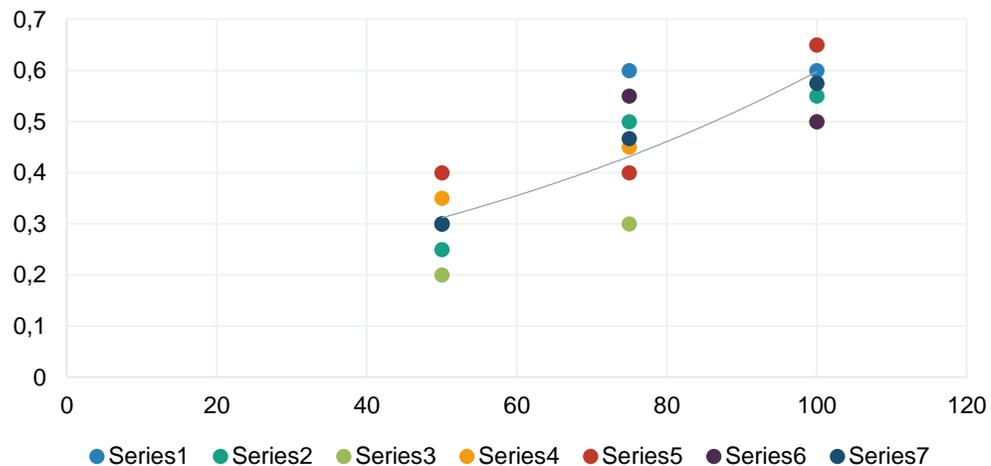


Grafica de pruebas en impresión 3D

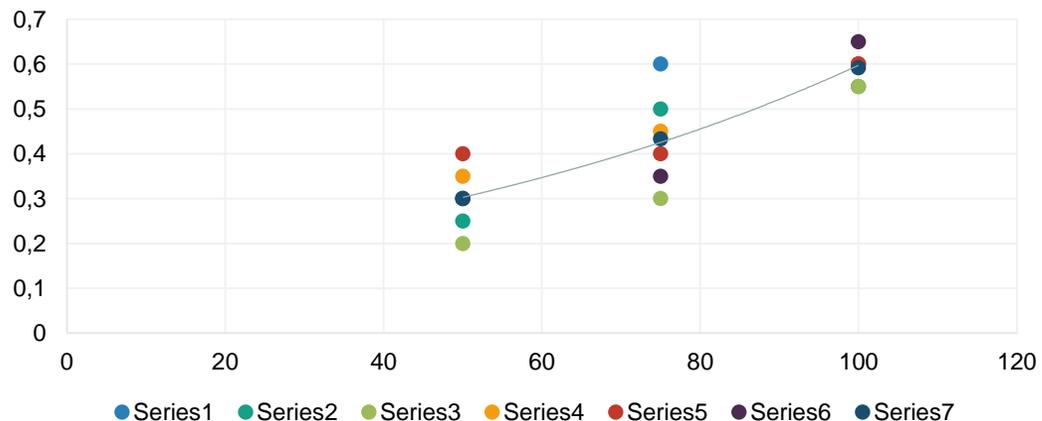
ERRORES EN IMPRESIÓN 3D PARA CUBOS



ERRORES EN IMPRESIÓN 3D PARA CILINDROS

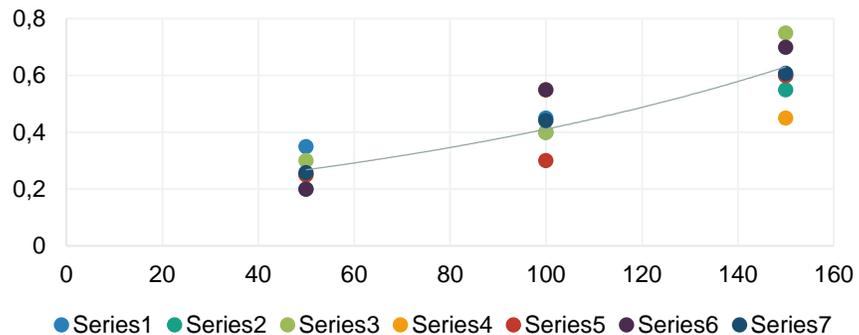


ERRORES EN IMPRESIÓN 3D PARA TRIÁNGULOS

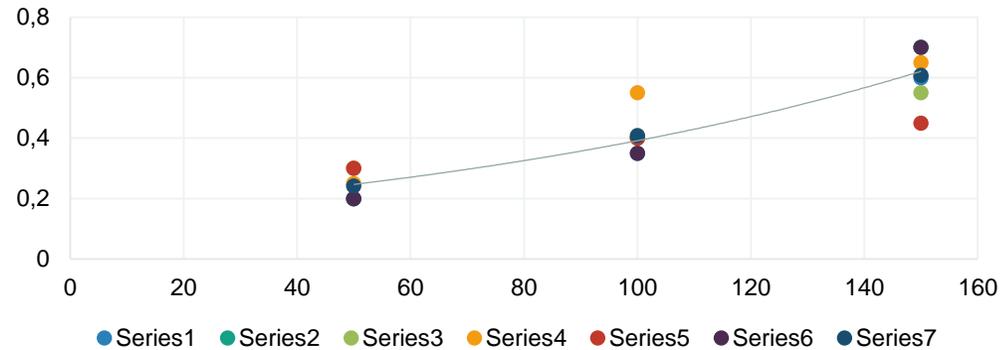


Grafica de pruebas en router

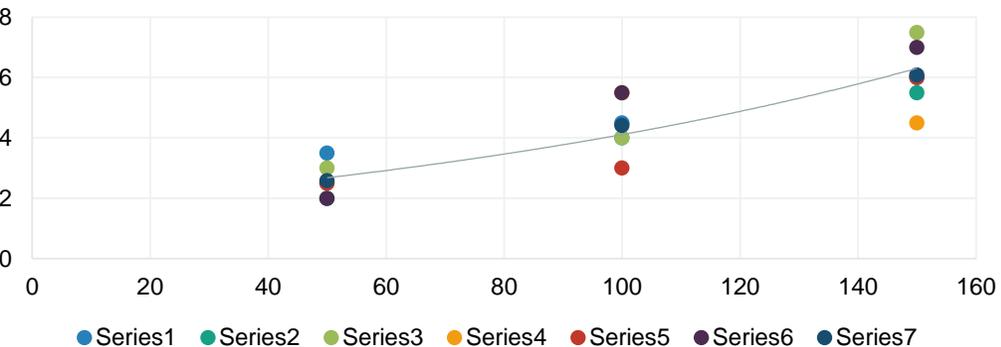
ERRORES EN TALLADO DE MADERA PARA CUADRADOS



ERRORES EN TALLADO DE MADERA PARA CIRCULOS



ERRORES EN TALLADO DE MADERA PARA TRIÁNGULOS



Resumen de pruebas

Las pruebas de posicionamiento dieron como resultado que la precisión de la máquina en el puente 1 es de 0.05 mm con una repetibilidad de 0.05 mm y para el puente 2 se tiene una precisión de 0.05 mm y una repetibilidad de 0.04 mm, esto para el uso de la máquina son ningún tipo de aplicación es decir en vacío

Las pruebas de corte láser han reflejado que el error máximo encontrado en esta aplicación es de 0.4 mm, se han probado los cortes en dos tipos de madera arrojando como resultado que se puede cortar a una distancia de 3 mm sobre el nivel de la pieza de trabajo un espesor de 4 mm en tabla triplex y 3 mm en tabla MDF

Las pruebas de impresión se realizaron con PLA a una temperatura de 200 grados Celsius, el error máximo encontrado para esta aplicación con una boquilla de 0.4 mm fue de 0.65 mm



Validación de hipótesis

- **Hipótesis**

El diseño e implementación de un sistema mecatrónico multifuncional permitirá realizar trabajos de manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado

- **Variable dependiente**

Diseño e implementación de un sistema mecatrónico multifuncional.

- **Variable independiente**

Manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado

Hipótesis Nula (H0): El sistema mecatrónico multifuncional no permitirá realizar trabajos de manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado

Hipótesis alternativa(H1): El sistema mecatrónico multifuncional permitirá realizar trabajos de manufactura aditiva y sustractiva mediante control numérico computarizado



Frecuencias observadas

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	9	9	7	25
	NO	0	0	2	2
	Total	9	9	9	27

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	3	4	5	12
	NO	6	5	4	15
	Total	9	9	9	27

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	8	6	9	23
	NO	1	3	0	4
	Total	9	9	9	27



Frecuencias esperadas

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	8.33	8.33	8.33	25
	NO	0.67	0.67	0.67	5
	Total	9	9	9	27

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	4	4	4	12
	NO	5	5	5	15
	Total	9	9	9	27

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	7.66	7.66	7.66	25
	NO	1.33	1.33	1.33	2
	Total	9	9	9	27



Chi cuadrado

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	0.05	0.05	0.21	0.31
	NO	0.67	0.67	2.64	3.98
	Total	0.7238	0.7238	2.85	4.29

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	0.25	0	0.25	0.5
	NO	0.2	0	0.2	0.4
	Total	0.45	0	0.45	0.9

		Clase			
		Triángulo	Cuadrado	Círculo	Total
Corte valido	SI	0.015	0.23	0.35	0.595
	NO	0.08	2.09	1.33	3.5
	Total	0.095	1.56	2.44	4.095



Validación de hipótesis

gl	Valor-p							
	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001
1	0.45	1.32	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88	10.83
2	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60	13.82
3	2.37	4.11	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84	16.27
4	3.36	5.39	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86	18.47
5	4.35	6.63	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75	20.52
6	5.35	7.84	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55	22.46
7	6.35	9.04	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28	24.32
8	7.34	10.22	13.36	15.51	17.53	20.09	21.95	26.12
9	8.34	11.39	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59	27.88
10	9.34	12.55	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19	29.59
11	10.34	13.70	17.28	19.68	21.92	24.72	26.76	31.22

El promedio de los tres valores de chi cuadrado para las aplicaciones da un total de 3.095 comparando con el valor de la tabla de chi cuadrado para 0.25 de confiabilidad (figura 60) se tiene 2.77



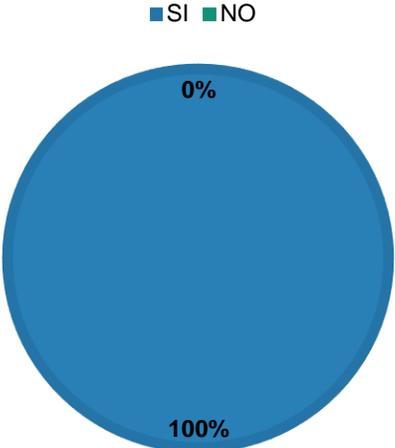
Preguntas encuesta

1. ¿Considera útil la máquina CNC presentada?
2. ¿Pudo como operario realizar las aplicaciones requeridas?
3. ¿Considera que la máquina presentada puede ser usada con estudiantes?
4. ¿Cómo calificaría el diseño de la máquina presentada?
5. ¿Considera que la máquina posee una facilidad de uso?
6. ¿Considera que el funcionamiento de la máquina es el óptimo?
7. ¿La explicación realizada resolvió sus dudas?

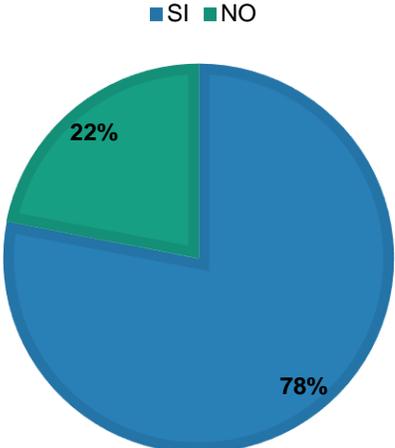


Validación funcional

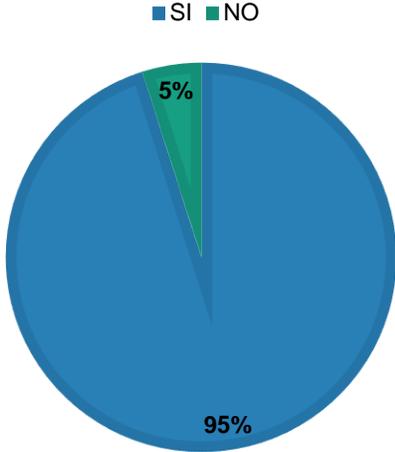
FRECUENCIA



FRECUENCIA



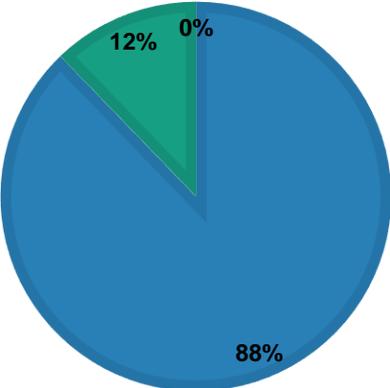
FRECUENCIA



Validación funcional

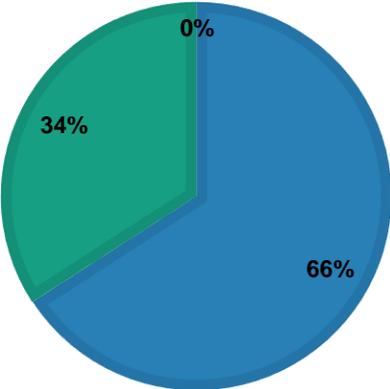
FRECUENCIA

■ BUENO ■ REGULAR ■ MALO



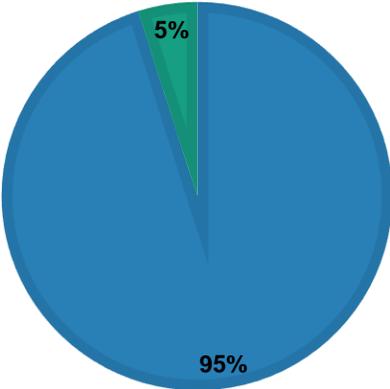
FRECUENCIA

■ BUENO ■ REGULAR ■ MALO



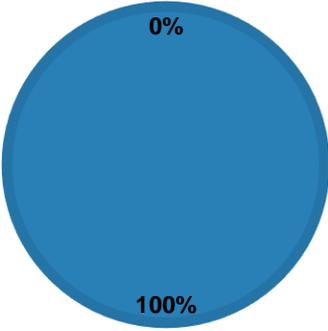
FRECUENCIA

■ SI ■ NO



FRECUENCIA

■ SI ■ NO



Conclusiones

- Se diseñó e implemento 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.
- El uso de rodamientos lineales cilíndricos de baja precisión, produce una vibración en los procesos llevados a cabo, y se denota aún más en el router en donde existe una fuerza axial de corte que amplifica dicha vibración afectando a la precisión de la máquina durante el proceso
- El uso de guías lineales cilíndricas produce un pandeo mínimo que afecta a la resolución de la máquina en especial al proceso de ruteado
- Los motores a pazos funcionan de correcta en cuanto a su torque en bajas velocidades, pero a medida que aumenta la velocidad del motor se reduce considerablemente la fuerza del mismo llegando a perder pasos.

Recomendaciones

- Para evitar variación de corriente y más duración de la máquina en un futuro cambiar los drivers del puente de impresión 3D y corte láser por TB6600 los cuales pueden mantener un suministro de corriente constante además que no se calientan.
- Buscar una implementación de cama caliente para las impresiones puesto que ayudaría a adherirse de mejor manera al material
- Si se requiere usar en puente de fresado para materiales más duros se recomienda cambiar los motores a pasos por servomotores puesto que poseen un mismo torque a diferentes velocidades
- Se recomienda utilizar rodamientos lineales HIWIN, puesto que tiene una precisión mucho mayor a la de los rodamientos lineales comunes, aunque también hay un incremento en el precio de los mismos
- Se recomienda el uso de servomotores en las aplicaciones que se necesite un torque considerable con una velocidad de trabajo bastante altas
- Se recomienda usar guías prismáticas ya que se aseguran mejor a los bloques en donde van montados los cabezales de trabajo
- Una de las recomendaciones más recibidas en las encuestas es el diseño de un mejor HMI que permita leer los datos en cada momento en que se realizan las operaciones



Muchas gracias



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA