

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



Diseño de una máquina de grabado láser portátil para la empresa
HARTMADE®

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Jason Steven Sánchez Freeman

Cartago, 3 de diciembre de 2021



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Declaratoria de Autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 3 de diciembre de 2021



Jason Steven Sánchez Freeman

Céd: 304880410

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

El profesor asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica para ser defendido ante el jurado evaluador, como requisito final para aprobar el curso Proyecto Final de Graduación y optar así por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura.

Estudiante: Jason Steven Sánchez Freeman

Proyecto: Diseño de una máquina de grabado láser portátil para la empresa HARTMADE®.

IVAN ARAYA
MENESES
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
IVAN ARAYA MENESES
(FIRMA)
Fecha: 2021.08.24 08:25:06
-06'00'

MSc. -Ing. Iván Araya Meneses

Asesor

Cartago, 30 de agosto 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
PROGRAMA DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto final de graduación defendido ante el presente jurado evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero(a) en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, según lo establecido por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Jason Steven Sánchez Freeman

Proyecto: Diseño de una máquina de grabado láser portátil para la empresa HARTMADE®.

Miembros del jurado evaluador

JOHANNA VANESSA
MUÑOZ PEREZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por
JOHANNA VANESSA MUÑOZ
PEREZ (FIRMA)
Fecha: 2021.12.03 21:00:37 -06'00'

ANA MARIA MURILLO
MORGAN (FIRMA)

Firmado digitalmente por ANA
MARIA MURILLO MORGAN
(FIRMA)
Fecha: 2021.12.03 17:18:12 -06'00'

MSc. -Ing. Johanna Muñoz Pérez

Jurado

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado

ROGER STUART
MELENDEZ
POLTRONIERI
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
ROGER STUART MELENDEZ
POLTRONIERI (FIRMA)
Fecha: 2021.12.03 17:29:14
-06'00'

MSc. -Ing. Roger Meléndez Poltronieri

Jurado

Los miembros de este jurado dan fe de que el presente proyecto final de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el programa de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 03 de diciembre 2021

Resumen

La empresa HARTMADE® es una Pyme que se dedica al diseño y manufactura de elementos principalmente en madera sostenible, que posee la limitación de no poder movilizar la única máquina para grabado y corte láser ya que resulta difícil debido al tamaño, al costo y el riesgo; por lo que, realizar demostraciones y obtener una experiencia con el cliente más visual y personalizada a la hora de manufacturar los productos, no es posible.

A raíz del problema anterior, basado el proceso de diseño de ingeniería y los lineamientos de seguridad de la norma IEC 60825, se detalla el proceso de diseño de un sistema de 3 grados de libertad (X, Y y Z) con la capacidad de realizar movimientos de los ejes de forma manual mediante una botonera y el obtener grabados mediante la utilización de un diodo láser y la comunicación con la computadora, con un área de trabajo de 50 cm en el eje X y 35 cm en el eje Y, con una precisión promedio de $\pm 0,18$ mm en el eje X y para el caso del eje Y $\pm 0,15$ mm, obteniendo un valor en movimiento diagonal de $\pm 0,23$ mm y un valor de similitud en el grabado de un 75,7 % respecto a un resultado realizado en la máquina láser de CO2 que posee la empresa.

Palabras clave: 3 grados de libertad, grabado láser, diodo láser, prototipo funcional, botonera, GRBL

Abstract

The company HARTMADE® is a SME dedicated to design and manufacture of elements mainly in sustainable wood, which has the limitation of not being able to mobilize their only machine for laser engraving and cutting as it is difficult due to size, cost and risk; therefore, demonstrate and obtain a more visual and personalized customer experience when they manufacture their products, is not possible.

As a result of the previous problem, based on the engineering design process and the safety guidelines of the IEC 60825 standard, the design process of a 3 degrees of freedom system (X, Y and Z) with the ability to perform movements of the axes manually using a keypad and obtaining engravings using a laser diode and communication with the computer, with a working area of 50 cm on the X axis and 35 cm on the Y axis, with a average precision of ± 0.18 mm in the X axis and for the case of the Y axis ± 0.15 mm, obtaining a precision value in diagonal movement of ± 0.23 mm and a similarity value in engraving of 75 , 7% compared to a result made in the CO2 laser machine that the company owns.

Keywords: 3 DOF, laser engraving, laser diode, functional prototype, keypad, GRBL.

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico a mis papás Mileydi Freeman Madriz y Marvin Sánchez Delgado, mi hermana Leslie Sánchez Freeman y a mi novia Kenia Monestel Salgado, que durante todo mi proceso como estudiante universitario me brindaron todo el apoyo, confianza y consejos que me permitieron llegar a ser la persona que soy ahora. Me acompañaron tanto en los momentos buenos como en los más difíciles que se me presentaron y nunca me abandonaron. Sin ellos llegar a este punto no hubiera sido posible.

Agradecimiento

Le agradezco a Arturo Gamboa Solís y Melissa Arias Q., por permitirme desarrollar el proyecto en su empresa HARTMADE®.

Agradecimiento especial a Arturo Gamboa como asesor de la empresa por toda la ayuda, consejos, el tiempo, preocupación y apoyo brindado durante la elaboración del proyecto, fue una persona indispensable para cumplir con el objetivo.

Al profesor Iván Araya Meneses mi tutor de la universidad le agradezco por toda la confianza, el apoyo y los consejos que siempre me brindo, que me permitieron completar el presente proyecto.

A todos los profesores, compañeros y amigos que han sido parte de mi carrera universitaria, gracias por todo.

Lista de Contenidos

Lista de Figuras	iii
Lista de Tablas	vii
Lista de Abreviaciones	viii
1 Introducción.....	1
1.1 Entorno del proyecto.....	1
1.2 Descripción del problema a resolver	2
1.3 Síntesis del problema.....	4
1.4 Objetivo General.....	5
1.5 Objetivos específicos.....	5
1.6 Estructura del documento	6
2 Marco Teórico	7
2.1 Láser	7
2.2 Tarjeta de desarrollo.....	8
2.3 Motores a pasos	9
2.4 Driver	12
2.5 Deflexión.....	13
2.6 GRBL	14
2.7 Norma IEC 60825	16
3 Metodología	21
3.1 Identificación de requerimientos y establecimiento de especificaciones	24
3.2 Generación y selección del concepto.....	26
3.2.1 División del problema	27
3.2.2 Búsqueda externa	28
3.2.3 Subproblema de diseño mecánico	29
3.2.4 Subproblema diseño eléctrico.....	43
3.2.5 Programa de control por computadora.....	54
4 Propuesta de Diseño	57
4.1 Diseño mecánico.....	57
4.1.1 Diseño del eje Z	57
4.1.2 Diseño del eje X	62
4.1.3 Diseño del eje Y	74
4.1.4 Elemento de ajuste de los ejes	80

4.1.5	Diseño de la carcasa	81
4.2	Diseño eléctrico	90
4.2.1	Motores	90
4.2.2	Circuito general y el circuito antirrebotes	96
4.3	Diseño lógico.....	100
5	Resultados y Análisis.....	119
5.1	Prototipo	119
5.1.1	Calibración	121
5.1.2	Pruebas de validación del movimiento	125
5.2	Simulación de elementos mecánicos	150
5.3	Comprobación del funcionamiento de la botonera.....	163
5.4	Cumplimiento de la norma IEC 60825.....	177
5.5	Limitaciones	178
5.6	Análisis Económico.....	179
6	Conclusiones y Recomendaciones.....	188
6.1	Conclusiones.....	188
6.2	Recomendaciones.....	189
7	Referencias bibliográficas	190
A.	Apéndice A. Diagrama de flujo	192
B.	Apéndice B. Tablas de medición de desplazamiento.....	193
C.	Apéndice C. Resultados financieros sin el costo de diseño.....	201
D.	Apéndice D. Encuesta de necesidades.....	203
E.	Apéndice E. Planos mecánicos.....	205
F.	Apéndice F. Plano eléctrico	238

Lista de Figuras

Figura 2-1. Diodo láser. Fuente: www.eletronotec.pe	7
Figura 2-2. Placa de desarrollo Arduino Mega, con procesador 2560 Fuente: Tienda BricoGeek	9
Figura 2-3. Motor a pasos. Fuente: www.NosinmiArduino.com	9
Figura 2-4. Representación interna de un motor a pasos. Fuente: electroclub.com	10
Figura 2-5. Sistema de transmisión de potencia de una barra roscada con conexión directa. Fuente: https://www.orientalmotor.com	12
Figura 2-6. Driver DRV8825. Fuente: CRcibernetica	13
Figura 2-7. Condiciones de continuidad y frontera para el análisis de la deflexión. Fuente: [12]	14
Figura 2-8. Logo del programa controlador GRBL. Fuente: [14]	14
Figura 2-9. Logo del programa controlador GRBL-Mega-5X. Fuente: [15]	15
Figura 3-1. Proceso de diseño seguido durante el desarrollo del proyecto. Elaboración propia	22
Figura 3-2. Diagrama general del proceso. Elaboración propia.	27
Figura 3-3. Dirección de cada uno de los ejes del sistema. Elaboración: Propia	29
Figura 4-1. Diseño del eje Z. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 4-2 A) Diseño del eje X. B) El eje X con el eje Z. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 4-3. Diagrama de cuerpo libre de la viga. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 4-4.A) Diagrama de fuerza cortante transversal para la viga del eje X. B) Diagrama de momento flector para la viga del eje X. Fuente: Elaboración propia	65
Figura 4-5. Corte de sección 1. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 4-6. Corte de sección 2. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 4-7. Factores según el acabado superficial	71
Figura 4-8. A) Diseño del eje Y. B) El eje Y con el eje X y Z. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 4-9. A) Diagrama de fuerza cortante transversal para la viga del eje Y. B) Diagrama de momento flector para la viga del eje Y. Fuente: Elaboración propia	76
Figura 4-10. Elementos para ajustar y evitar el tambaleo de los ejes X y Y. Fuente: Elaboración propia	80
Figura 4-11. Diseño de la carcasa del sistema de grabado láser. Fuente: Elaboración propia	81
Figura 4-12. Parte trasera para la colocación de los elementos eléctricos de control. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 4-13. Caja rectangular realizado para el manejo de cables. Fuente: Elaboración propia	83
Figura 4-14. Botonera, los interruptores de motores y láser y llave de seguridad. Fuente: Elaboración propia	84
Figura 4-15. Puertas de la carcasa cerrada y abierta. Fuente: Elaboración propia	85
Figura 4-16. Vista superior de la carcasa. Fuente: Elaboración propia	86
Figura 4-17. Primer diseño para las paredes de la carcasa. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 4-18. Segundo diseño para las paredes de la carcasa. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 4-19. Señal de advertencia. Fuente: Norma IEC 60825	89
Figura 4-20. Señal explicativa de la utilización láser. Fuente: Norma IEC 60825	89
Figura 4-21. Señal explicativa para las puertas del láser Fuente: Norma IEC 60825	89
Figura 4-22. Señal informativa. Fuente. Elaboración propia	89
Figura 4-23. Circuito antirrebotes para los botones tipo pulsadores. Fuente: Elaboración propia	98
Figura 4-24. Circuito de control de la alimentación de los sistemas. Fuente: Elaboración propia	98
Figura 4-25. Interruptor con llave utilizado. Fuente: https://www.microjpm.com/	99
Figura 4-26. Se incluye la librería Arduino. Fuente: Elaboración propia.	103
Figura 4-27. Asignación de los pines por utilizar. Fuente: Elaboración propia	104
Figura 4-28. Pines de la tarjeta Ramps. Fuente: osoyoo.com	105
Figura 4-29. Declaración del modo de funcionamiento de los pines. Fuente: Elaboración propia.	106

Figura 4-30. Código de lectura de los pines para el movimiento individual de los ejes. Fuente: Elaboración propia _____	108
Figura 4-31. Código de lectura del pin para la colocación de un nuevo origen en X y Y. Fuente: Elaboración propia _____	110
Figura 4-32. Código de lectura del pin para la colocación de un nuevo origen en Z. Fuente: Elaboración propia _____	110
Figura 4-33. Código de lectura del pin para la colocación de un nuevo origen en Z. Fuente: Elaboración propia _____	111
Figura 4-34. Código de lectura del pin para cambiar la distancia del desplazamiento. Fuente: Elaboración propia _____	112
Figura 4-35. Instrucción para verificación de estado. Fuente: Elaboración propia _____	113
Figura 4-36. Variables globales para el movimiento simple de cada eje. Fuente: Elaboración propia _____	113
Figura 4-37. Inicialización de las variables para el movimiento. Fuente: Elaboración propia _____	114
Figura 4-38. Cambio de signo del código G para el movimiento simple del eje. Fuente: Elaboración propia _____	115
Figura 4-39. Código base para el movimiento del eje de forma simple con la botonera. _____	116
Figura 4-40. Código para establecer un nuevo origen tanto en X y Y o en únicamente Z. Fuente: Elaboración propia _____	117
Figura 4-41. Código para establecer una nueva distancia de desplazamiento. Fuente: Elaboración propia _____	118
Figura 4-42. Código para realizar la tarea de regresar al origen en los ejes X y Y, únicamente el eje Z y los ejes X, Y y Z. Fuente: Elaboración propia. _____	118
Figura 5-1. Prototipo realizado A) Prototipo de estructura de ejes. B) Prototipo de botonera. C) Circuito antirrebotes. Fuente: Elaboración propia _____	121
Figura 5-2. Parámetros de configuración del GRBL desde el “GRBL Laser” _____	122
Figura 5-3. Forma de la distribución t-Student. Fuente: [23] _____	126
Figura 5-4. Prueba de normalidad de las muestras realizadas en el eje X. Fuente: Elaboración propia _____	129
Figura 5-5. Prueba de normalidad de las muestras realizadas en el eje Y. Fuente: Elaboración propia. _____	129
Figura 5-6. Resultados de la estadística descriptiva para las pruebas del eje X. Fuente: Elaboración propia. _____	132
Figura 5-7. Resultados de la estadística descriptiva para las pruebas del eje Y. Fuente: Elaboración propia. _____	132
Figura 5-8. a) Prueba de hipótesis para el las mediciones del eje X b) Prueba de hipótesis para el las mediciones del eje Y. Fuente: Elaboración propia. _____	133
Figura 5-9. a) Gráfica de caja de prueba 1X b) Gráfica de caja de prueba 2X c) Gráfica de caja de prueba 3X d) Gráfica de caja de prueba 4X e) Gráfica de caja de prueba 5X. Fuente: Elaboración propia _____	134
Figura 5-10. a) Gráfica de caja de prueba 1Y b) Gráfica de caja de prueba 2Y c) Gráfica de caja de prueba 3Y d) Gráfica de caja de prueba 4Y e) Gráfica de caja de prueba 5Y. Fuente: Elaboración propia. _____	135
Figura 5-11. Comportamiento del error en el movimiento diagonal. Fuente: Elaboración propia _____	136
Figura 5-12. Prueba de grabado de círculos. Fuente: Elaboración propia _____	137
Figura 5-13. Prueba de grabado de arcos. Fuente: Elaboración propia _____	137
Figura 5-14. Prueba de grabado de líneas diagonales. Fuente: Elaboración propia _____	138
Figura 5-15. Prueba de grabado de cuadrados. Fuente: Elaboración propia. _____	138
Figura 5-16. Prueba de grabado de hexágonos. Fuente: Elaboración propia. _____	139
Figura 5-17. Imagen seleccionada para las pruebas de grabado. Fuente: Elaboración propia _____	140

Figura 5-18. Escala de grabado para el MDF de 10% al 20% de potencia y de 800 mm/min a 1500 mm/min. Fuente: Elaboración propia.	140
Figura 5-19. Resultado de grabado cartón. Fuente: Elaboración propia	141
Figura 5-20. Resultado de grabado en MDF. Fuente: Elaboración propia	142
Figura 5-21. Resultado de grabado en madera. Fuente: Elaboración propia	143
Figura 5-22. Resultado de grabado en acrílico negro. Fuente: Elaboración propia	144
Figura 5-23. Grabado por la máquina RedSail con parámetros similares a máquina la del proyecto. Fuente: Elaboración propia	145
Figura 5-24. Grabado por la máquina RedSail con parámetros de producción. Fuente: Elaboración propia.	146
Figura 5-25. Código de Matlab para la comparación de las fotografías. Fuente: Elaboración propia.	147
Figura 5-26. Comparación de la imagen de referencia y la imagen resultado obtenida de la máquina del proyecto. Fuente: Elaboración propia	148
Figura 5-27. Histogramas del grabado en escala de grises. A) Grabado de referencia B) grabado resultado. Fuente: Elaboración propia.	149
Figura 5-28. Comparación de la imagen de referencia con la imagen resultado y su índice de similitud. Fuente: Elaboración propia	149
Figura 5-29. Modelo para verificar las dimensiones del área de trabajo obtenida. Fuente: Elaboración propia	150
Figura 5-30. Área de trabajo del eje X. Fuente: Elaboración propia	151
Figura 5-31. Área de trabajo del eje Y. Fuente: Elaboración propia	152
Figura 5-32. Área de trabajo del eje Z. A) Distancia del láser a la base B) Área de trabajo Z. C) Distancia del láser con respecto al área de trabajo máxima. Fuente: Elaboración propia	153
Figura 5-33. Deflexión de la viga del eje X. Fuente: Elaboración propia	154
Figura 5-34. Deflexión de la viga del eje Y. Fuente: Elaboración propia	154
Figura 5-35. Simulación de elemento transmisor de potencia del eje X	155
Figura 5-36. Simulación del elemento transmisor de potencia del eje Y. Fuente: Elaboración propia.	156
Figura 5-37. Enumeración de piezas modeladas. Fuente: Elaboración propia	157
Figura 5-38. Esfuerzo de Von Mises de la pieza que soporta el peso del láser para elevación. Fuente: Elaboración propia	158
Figura 5-39. Desplazamiento debido a la deformación en la pieza que soporta el peso del láser para elevación. Fuente: Elaboración propia	158
Figura 5-40. Esfuerzo de Von Mises de la pieza que soporta el peso del eje Z. Fuente: Elaboración propia	159
Figura 5-41. Desplazamiento debido a la deformación en la pieza que soporta el peso del eje Z. Fuente: Elaboración propia	160
Figura 5-42. Esfuerzo de Von Mises de la pieza guía del eje X. Fuente: Elaboración propia	161
Figura 5-43. Esfuerzo de Von Mises de la pieza de soporte del eje X y guía del eje Y. Fuente: Elaboración propia	162
Figura 5-44. Esfuerzo de Von Mises de la pieza de soporte de la estructura de los ejes. Fuente: Elaboración propia	163
Figura 5-45. Prueba de botón sin circuito antirrebotes A) Mensaje desplegado B) Coordenada reportada. Fuente: Elaboración propia	164
Figura 5-46. Botón con circuito antirrebotes movimiento X positivo y negativo. A) Mensaje desplegado con X positivo. B) Coordenada reportada al presionar X positivo. C) Mensaje desplegado con X negativo. D) Coordenada reportada al regresar al presionar X negativo. Fuente: Elaboración propia	165

Figura 5-47. Botón con circuito antirrebotes movimiento Y positivo y negativo. A) Mensaje desplegado con Y positivo. B) Coordenada reportada al presionar Y positivo. C) Mensaje desplegado con Y negativo. D) Coordenada reportada al regresar al presionar Y negativo. Fuente: Elaboración propia	167
Figura 5-48. Botón con circuito antirrebotes movimiento Z positivo y negativo. A) Mensaje desplegado con Z positivo. B) Coordenada reportada al presionar Z positivo. C) Mensaje desplegado con Z negativo. D) Coordenada reportada al regresar al presionar Z negativo. Fuente: Elaboración propia	168
Figura 5-49. Prueba de cambio de avance A) Cambio de avance 1 (1,0 mm.) B) Cambio de avance 2 (10,0 mm). C) Cambio de avance 3 (0,1 mm). Fuente: Elaboración propia	169
Figura 5-50. Combinando el cambio de avance con el movimiento del eje X. Fuente: Elaboración propia	170
Figura 5-51. Resultado de prueba de botón para un nuevo origen en X y Y. A) Coordenadas inicial para la prueba de nuevo origen en X y Y. B) Mensaje desplegado del cambio de coordenadas en X y Y. C) Muestra del cambio en las coordenadas en X y Y. Fuente: Elaboración propia	171
Figura 5-52. Resultado de prueba de botón para un nuevo origen en Z. A) Coordenadas inicial para la prueba de nuevo origen en Z. B) Mensaje desplegado del cambio de coordenadas en Z. C) Muestra del cambio en las coordenadas en Z. Fuente: Elaboración propia	173
Figura 5-53. Resultados de prueba de dirigirse al origen en X y Y. A) Coordenadas inicial para la prueba de movimiento al origen en X y Y. B) Mensaje desplegado del movimiento al origen en X y Y C) Muestra la posición en el origen en X y Y. Fuente: Elaboración propia	174
Figura 5-54. Resultados de prueba de dirigirse al origen en Z. A) Coordenadas inicial para la prueba de movimiento al origen en Z. B) Mensaje desplegado del movimiento al origen en Z C) Muestra la posición en el origen en Z. Fuente: Elaboración propia	175
Figura 5-55. Prueba de dirigirse al origen en X, Y y Z. A) Coordenadas inicial B) Mensaje del movimiento al origen en X, Y y Z C) Muestra del regreso de Z, X y Y al origen, D) Posición final de los ejes X, Y y Z. Fuente: Elaboración propia.	177
Figura 5-56. Neje Master 2S. Obtenido de Amazon.com	184
Figura 5-57. Ortur Laser Master. Obtenido de amazon.com	185

Lista de Tablas

Tabla 2-1. Clasificación láser según la norma IEC 60825.	16
Tabla 2-2. Consideraciones de seguridad y control de riesgos según la clase dadas por la norma IEC 60825-1	19
Tabla 3-1. Especificación de requerimientos y su importancia relativa al diseño del sistema.	24
Tabla 3-2. Lista de métricas y su importancia relativa.	25
Tabla 3-3. Valores objetivos por métrica.	26
Tabla 3-4. Matriz de selección del diseño de la base.	31
Tabla 3-5. Resultado de la selección del diseño de la base.	32
Tabla 3-6. Sistemas para la transmisión de potencia.	33
Tabla 3-7. Matriz de selección del sistema de transmisión de potencia.	35
Tabla 3-8. Resultado de la selección del sistema de transmisión de potencia.	35
Tabla 3-9. Materiales para la estructura del sistema.	37
Tabla 3-10. Matriz de selección del material estructural.	40
Tabla 3-11. Resultado de la selección del material estructural.	41
Tabla 3-12.. Comparación de ventajas y desventajas según el tipo motor.	43
Tabla 3-13. Matriz de selección del tipo de motor a utilizar.	45
Tabla 3-14. Resultado de la selección del tipo de motor por utilizar.	46
Tabla 3-15. Comparación de ventajas y desventajas de las propuestas de solución para la tarjeta de desarrollo	47
Tabla 3-16. Matriz de selección del tipo de tarjeta de desarrollo a implementar.	50
Tabla 3-17. Resultado de la selección de la tarjeta de desarrollo por utilizar.	50
Tabla 3-18. Matriz de selección del láser a implementar	53
Tabla 3-19. Resultado de la matriz de selección del láser a implementar	54
Tabla 3-20. Ventajas y desventajas de los programas de control	55
Tabla 4-1. Masa que soporta el eje Z	59
Tabla 4-2. Masa que soporta el eje X	64
Tabla 4-3. Masa que soporta el eje Y	75
Tabla 4-4. Tabla resumen para el elemento de transmisión de potencia.	79
Tabla 4-5. Tipos de filtros.	82
Tabla 4-6. Datos importantes para el diseño del motor para cada eje extraídos del modelo.	90
Tabla 4-7. Valores requeridos para el cálculo de TL para el eje X.	92
Tabla 4-8. Valores requeridos para el cálculo de TL para el eje Y.	93
Tabla 4-9. Designación de los pines	105
Tabla 5-1. Resultado de la medición de los desplazamientos de 100 mm del eje X.	127
Tabla 5-2. Resultado de la medición de los desplazamientos de 100 mm del eje Y.	128
Tabla 5-3. Promedio, desviación estándar y varianza de los datos muestreados.	130
Tabla 5-4. Resumen de los parámetros definidos	144
Tabla 5-5. Resumen de aspectos incorporados al proyecto a partir de la norma IEC 60825	177
Tabla 5-6. Costo de los elementos eléctricos	180
Tabla 5-7. Costo de los elementos mecánicos.	181
Tabla 5-8. Costo de las partes de la carcasa.	182
Tabla 5-9. Costos totales.	183
Tabla 5-10. Indicadores financieros con todos los costos.	183
Tabla 5-11. Características de la Neje Master 2S.	184
Tabla 5-12. Características de la Ortur Laser Master	185
Tabla 6-1- Parámetros establecidos para el grabado.	188

Lista de Abreviaciones

I_0 : Momento de inercia del rotor.

I_L : Momento de inercia de la carga.

t_1 : Tiempo de aceleración.

N_M : Velocidad de operación.

V_L : Velocidad lineal.

P_B : Paso de la barra roscada.

t_1 : Tiempo de aceleración

t_0 : Tiempo de desplazamiento

F : Fuerza en dirección del movimiento.

μ_0 : Coeficiente de fricción de la tuerca.

F_0 : Precarga

η : Eficiencia.

F_A : Fuerza externa.

m : Masa total de la carga.

g : Gravedad.

θ : Ángulo de elevación respecto a la horizontal.

μ : Coeficiente de fricción del sistema deslizante.

T: Torque

d_m : Diámetro Medio

d_r : Diámetro menor

d_c : Diámetro medio del collarín

τ_x : Esfuerzo cortante

σ : Esfuerzo normal

σ' : Esfuerzo de Von Mises

I: Momento de inercia

E: Modulo de elasticidad

c: Radio

C: Capacitor

R: Resistencia

V_{ref} : Voltaje de referencia

\bar{x} : Estadística

μ : Media

ν : Grados de libertad

IoT. Internet de las cosas

S_e : Resistencia a la fatiga

1 Introducción

1.1 Entorno del proyecto

El proyecto que se describe en este informe se llevó a cabo en una PYME que posee el nombre de HARTMADE ®, la cual se encuentra ubicada en el cantón de Turrialba, de la provincia de Cartago.

La empresa es fundada en el año 2016, por el Ingeniero Arturo José Gamboa Solís, que posee una preparación en ingeniería en construcción, egresado del Tecnológico de Costa Rica y con una experiencia de más de 10 años en construcción civil en proyectos hidroeléctricos, junto con el apoyo de su esposa Melissa Arias Q. (Copropietaria). [1]

La visión de la empresa por parte de los propietarios es la siguiente:

“Innovar en el arte de trabajar la madera”

Con base a lo anterior, la empresa se dedica principalmente a la manufactura de productos en el ámbito artesanal con la utilización de madera certificada en manejo forestal sostenible, pero su principal propuesta de valor es agregando obras de arte en sus productos mediante la utilización de tecnologías modernas como lo es el corte y grabado láser. [2]

Además, la empresa ofrece servicios adicionales como lo son: la personalización de productos según el deseo del cliente, el grabado y corte mediante láser, la posibilidad de desarrollar nuevos proyectos con clientes o empresas y realizar ventas al por mayor o al detalle.

Por el momento el modelo de ventas es totalmente virtual mediante sus páginas de Facebook, Instagram, página web. También el contacto por teléfono o correo y se está trabajando en el proyecto de poder obtener su primera tienda física. [3]

1.2 Descripción del problema a resolver

La empresa HARTMADE® en la actualidad cuenta únicamente con una máquina de corte y grabado láser modelo X700 de la marca RedSail con unas dimensiones, de valores de 1160 x 870 x 960 mm con una masa de 210 kg [4]. Es una máquina robusta para trabajos de corte y grabado, pesada, de gran tamaño y de un valor elevado para estar movilizándolo de un lugar a otro exponiendo el equipo.

En su sitio web se menciona que, en el 2017, un año después de su creación, a la actualidad esta PYME ha logrado realizar más de 1000 proyectos personalizados a clientes, más la manufactura de los productos que ponen a disposición desde su catálogo de más de 40 modelos. [2]

Actualmente el canal de comunicación con sus clientes es de forma virtual, sin embargo, sus dueños se encuentran interesados en el proyecto de abrir la primera tienda física donde se pueda realizar una atención más personalizada y demostrativa del proceso de manufactura.

El Ingeniero Arturo Gamboa S., en la entrevista mencionó que la portabilidad de una máquina láser les permitiría realizar demostraciones en ferias de artesanías, ferias de negocios y en la eventual tienda física, también, con un equipo de menor tamaño se ahorrarían gran cantidad de espacio, lograrían descongestionar la láser X700 y permitiría realizar el proceso de personalización más visible para el usuario. [3]

Por lo tanto, un dispositivo capaz de realizar el grabado mediante láser de un tamaño que permita la movilidad y la portabilidad permitiría a HARTMADE® mejorar la relación con los clientes y eventualmente llamar más la atención de socios claves, buscando mayor oportunidad en el mercado.

Parte de las necesidades iniciales planteadas son las siguientes:

- Portabilidad.
- Apto para ser transportable.

- Tamaño de trabajo mínimo de 50 x 25 cm.
- Capaz de realizar el grabado de forma exitosa.
- Comunicación computadora-máquina vía conexión por cable.

1.3 Síntesis del problema

A la empresa HARTMADE® se les complica realizar demostraciones en ferias de negocios sobre el proceso de manufactura de sus productos, debido a la dificultad del transporte, costo y riesgo de exponer la única máquina que poseen para realizar corte y grabado láser. Además, los dueños buscan aumentar los canales de contacto con los clientes, mediante el proyecto de obtener su primera tienda física, donde parte de la idea del proyecto es que sea posible personalizar sus productos y dar una experiencia más visual al cliente.

1.4 Objetivo General

Diseñar un prototipo portable capaz de realizar grabado láser a materiales como madera y MDF de bajo espesor, con una capacidad de trabajo mínima de 50 x 25 cm y con capacidad de manejo mediante PC vía cable.

1.5 Objetivos específicos

- Realizar el diseño mecánico de la estructura y carcasa de la máquina de grabado láser que permita un área de trabajo de 50 x 25 cm y visibilidad del área de trabajo.
- Diseñar un sistema electromecánico que permita una resolución menor a 1 mm en el movimiento.
- Modificar el algoritmo de un programa controlador de código abierto de interpretación de código G para la colocación de una botonera, que permita el control manual de los ejes de la máquina de grabado láser.
- Establecer los parámetros de potencia y velocidad adecuados para el proceso de grabado de materiales como madera y derivados.

1.6 Estructura del documento

En el capítulo 2 denominado Marco Teórico, se muestra la definición de diferentes conceptos que están involucrados durante el desarrollo del proyecto, además de la realización de un resumen de la norma IEC 60825 para el conocimiento del lector.

El capítulo de metodología que corresponde al número 3, se detalla el proceso que es seguido durante la elaboración del proyecto. También se agregan las secciones donde se identifican las necesidades del proyecto, la generación de las diferentes propuestas de solución y la selección de la propuesta más viable, para así determinar el concepto con el que se trabajó y desarrollo el proyecto

En el capítulo 4 a partir del concepto seleccionado se desarrolló la propuesta de diseño, dividido en 3 secciones: 1. Diseño mecánico, 2. Diseño eléctrico y 3. Diseño lógico.

La comprobación del diseño realizado se encuentra el capítulo 5 de resultados y análisis donde se validó mediante simulaciones y prototipo los elementos diseñados con su respectivo análisis.

Por último, el capítulo 6 de conclusiones donde se concluye con los resultados importantes a partir de los objetivos planteados para el proyecto.

2 Marco Teórico

2.1 Láser

Un láser según [5] corresponde a “Un dispositivo electrónico que, basado en una emisión inducida, amplifica de manera extraordinaria un haz de luz monocromático y coherente”, lo que indica que es un haz de mayor potencia a la luz ordinaria, con longitudes de onda que se mantenga en un valor fijo y que las fases y frecuencias siempre se encuentran alineados.

Por lo tanto, un diodo láser corresponde a un semiconductor con características similares a un LED [6] por lo que a nivel industrial no corresponden a dispositivos de complejidad, con la diferencia que la focalización de la luz permite obtener mayor potencia en un solo punto. [7]

La fabricación de un diodo láser se basa en la unión de dos laminas muy delgadas, donde una es altamente reflectante y la otra en menor medida, por lo que permite la unión tipo PN con las caras de las láminas colocadas de forma paralelas. [7]

Entre las principales características de un diodo Led se destaca: [7]

- Gran eficiencia
- Confiables
- Económicos
- Pequeño peso y volumen



Figura 2-1. Diodo láser. Fuente: www.eletrotec.pe

2.2 Tarjeta de desarrollo

Un circuito o placa que involucra uno o más microcontroladores, pero uno de ellos como elemento principal que ejecuta instrucciones mediante un código generado y enviado al sistema para la realización de una o más tareas en específico, son las características de una placa de desarrollo. [8]

En una tarjeta de desarrollo presenta implementado el circuito de potencia alrededor del microcontrolador que suministra alimentación a las diferentes partes que lo componen, además mediante el código que es enviado al microcontrolador principal es posible brindar un valor de voltaje suficiente para el funcionamiento de las entradas y salidas y realizar tareas de lectura o escritura de sensores y actuadores. [8]

En la actualidad si la aplicación necesita características especiales en el controlador existen gran variedad de tipos de tarjetas de desarrollo para suministrar una base para la realización de proyectos. Las aplicaciones comúnmente utilizadas son: [8]

- Proyecto de diseño eléctrico.
- Dispositivos IoT.
- Dispositivos portables.
- Inteligencia artificial.

Un ejemplo de tarjeta de desarrollo es el que se muestra en la Figura 2-2, corresponde a un proyecto iniciado en 2005 con el nombre de Arduino. Este se encuentra comúnmente basado en el microcontrolador Atmel y posee varios modelos dependiendo del tamaño de aplicación o la cantidad de entradas y salidas que requiere el elemento a controlar.

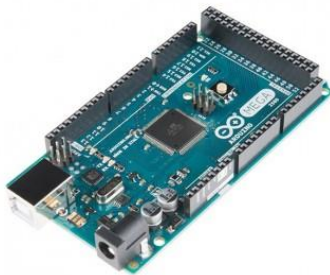


Figura 2-2. Placa de desarrollo Arduino Mega, con procesador 2560 Fuente:
Tienda BricoGeek

2.3 Motores a pasos

Los motores a pasos también son conocidos como “Motores de movimiento indexado”, el cual se encuentran diseñados para realizar girar hasta cierto ángulo según la excitación de las bobinas mediante señales eléctricas aplicadas en sus terminales. Según el modelo el motor a pasos las características constructivas cambian, por lo que existen configuraciones en las que los pasos se encuentran con separaciones entre cada uno entre los 1° hasta los 15°. [9]

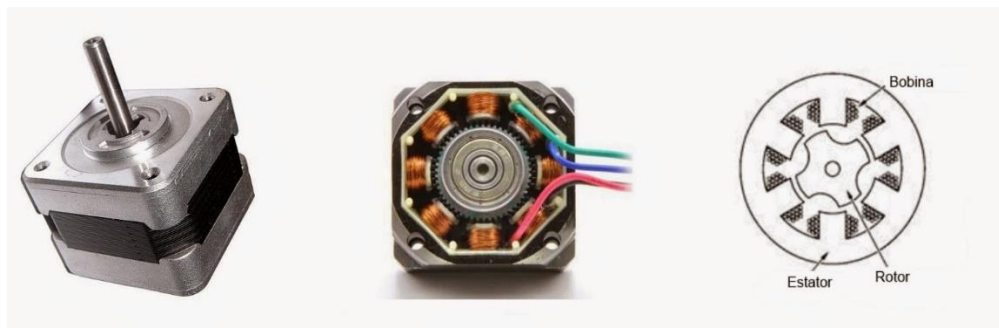


Figura 2-3. Motor a pasos. Fuente: www.NosinmiArduino.com

Estos motores con tan solo llevar un conteo de los pulsos que se envían al motor a pasos se pueden llegar a obtener la información precisa del elemento que se encuentre conectado al motor. Los movimientos pueden llegar a ser bruscos o suaves, esto depende de la frecuencia de trabajo y la magnitud de los pasos relacionados con la inercia que posee el motor. [9]

Se controlan mediante el cambio del flujo que pasa por las bobinas que forman el interior del motor, mediante el control de las tensiones que se aplican, los motores a pasos pueden controlar el sentido de rotación o la dirección de la rotación. [9]

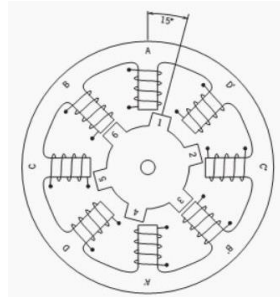


Figura 2-4. Representación interna de un motor a pasos. Fuente: electroclub.com

Los motores a pasos se pueden comparar con un motor síncrono con respecto al principio de funcionamiento, ya que se debe a un campo magnético rotativo que pone en marcha el rotor magnético. Estos motores se diferencian dependiendo de la forma en como esté conectado el devanado del estator (unipolar o bipolar) y por el material que se ha construido el rotor, ya sea de imán permanente o hierro dulce. [9]

La selección de un motor a pasos está definida por la cantidad de torque que el motor puede entregar al sistema, en la Ecuación (2-1) se muestra como el cálculo para la selección del motor se establece por el torque requerido de aceleración T_a y el torque requerido por la carga T_L que presenta el sistema.

$$T_M = T_a + T_L \quad (2.1)$$

Para el cálculo del torque requerido de aceleración para el motor a pasos se realiza mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_a = \frac{(I_0 + I_L) * N_M}{9,55 * t_1} \quad (2.2)$$

Donde:

I_0 : Momento de inercia del rotor.

I_L : Momento de inercia de la carga.

t_1 : Tiempo de aceleración.

N_M : Velocidad de operación.

Para la velocidad de operación para barras roscadas se tiene la siguiente formula:

$$N_M = \frac{60 * V_L}{P_B} \quad (2.3)$$

Donde:

V_L : Velocidad lineal.

P_B : Paso de la barra roscada.

El cálculo del tiempo de aceleración, se utiliza la relación que corresponde al 25% del tiempo de posicionar el elemento. Es decir:

$$t_1 = t_0 * 0,25 \quad (2.4)$$

En el cálculo del torque requerido por la carga se tienen los siguientes casos según el mecanismo de transmisión de potencia:

Caso donde el sistema corresponde a una barra roscada como la que se muestra Figura 2-5 mediante una conexión directa, la ecuación para T_L es la que se muestra en la ecuación (2.5).

$$T_L = \frac{F P_B}{2 \pi \eta} + \frac{\mu_s F_0 P_B}{2 \pi} \quad (2.5)$$

$$F = F_A + m g (\text{sen}(\theta) + \mu \text{cos}(\theta)) \quad (2.6)$$

Donde:

F : Fuerza en dirección del movimiento.

g : Gravedad.

μ_0 : Coeficiente de fricción de la tuerca.

θ : Ángulo de elevación respecto a la horizontal.

F_0 : Precarga ($F_0 = F/3$)

η : Eficiencia.

μ : Coeficiente de fricción del sistema deslizante.

F_A : Fuerza externa.

P_B : Paso de la barra roscada.

m : Masa total de la carga.

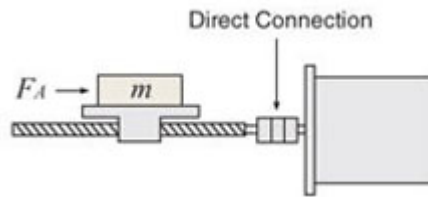


Figura 2-5. Sistema de transmisión de potencia de una barra roscada con conexión directa. Fuente: <https://www.orientalmotor.com>

2.4 Driver

Un Driver corresponde a un circuito eléctrico que se encuentra diseñado para controlar mediante voltaje el sentido de giro y la velocidad de los motores de corriente continua y corriente alterna. Además, son diseñados con elementos de protección para evitar que los elementos internos que posee el motor resulten dañados por excesos de corriente. Los drivers para motores a pasos son esenciales para evitar que la placa de control que se utilice se vea forzada y pueda dañarse debido a las limitaciones de la placa, además que proporciona protección por cortocircuito, sobretensión y aumento de la temperatura. [10]

Existen dos tipos de drivers según la necesidad:

- Para motor unipolar:

El controlador únicamente conoce la secuencia de activación de las bobinas debido a que en el motor la corriente circula siempre en la misma dirección. Para realizar un cambio de dirección, el controlador invierte el orden de la secuencia. [11]

- Para motor bipolar:

El controlador es más complejo ya que el motor tiene la capacidad de soportar la corriente en dos direcciones, por lo que el controlador debe ser capaz de cambiar el sentido de la corriente para cambiar la polaridad del campo magnético y realizar cambios de dirección en el giro del motor. [10]

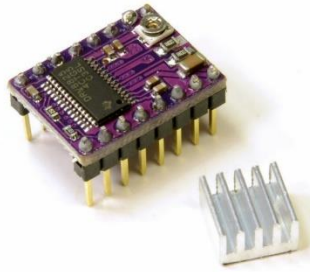


Figura 2-6. Driver DRV8825. Fuente: CRcibernetica

2.5 Deflexión

A raíz de la necesidad de generar integridad y buena estabilidad a una estructura o máquina se realizan análisis de deflexión en las vigas en puntos críticos o importantes específicos de una viga o eje. [12]

La deflexión se encuentra determinada por el valor que se obtenga al calcular la curva elástica del elemento y la pendiente en el punto de interés, mediante el análisis del momento interno en función de la distancia x . [12]

Para el análisis es importante reconocer las cargas externas que actúan en el elemento si se encuentran varias cargas se debe determinar funciones de momento independientes para cada una de las cargas e integrar las fórmulas (2-7) y (2-8). [13]

$$\theta = \frac{1}{EI} * \int M(x) dx \quad (2.7)$$

$$V = \frac{1}{EI} * \iint M(x) dx \quad (2.8)$$

Con el análisis de puntos de continuidad de las funciones, es posible realizar expresiones que permitan obtener la ecuación de la curva elástica como una ecuación continua, sin limitación por la cantidad de cargas que soporte el elemento. Se obtiene determinando con las condiciones frontera el valor de las constantes de integración. [12]

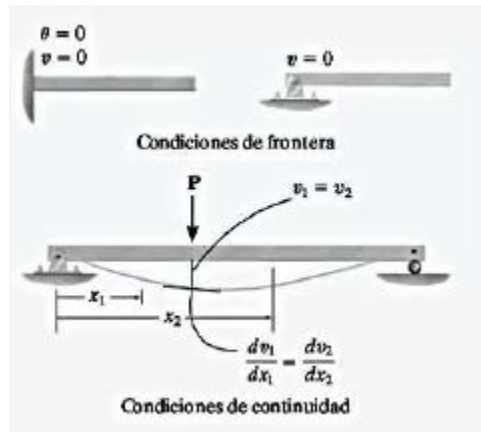


Figura 2-7. Condiciones de continuidad y frontera para el análisis de la deflexión.
Fuente: [12]

2.6 GRBL

GRBL es un programa controlador de código abierto que inicio partir del 2009 cuando Simen Svale Skogsrud, realizó las primeras publicaciones del proyecto, el cual está basado en el código del “Gcode Interpreter” de Mike Ellery. Posteriormente, en el año 2011 el proyecto queda en manos de Sungeun “Sonny” Jeon Ph.D. [14]



Figura 2-8. Logo del *programa controlador* GRBL. Fuente: [14]

Este programa controlador se encuentra desarrollado con la finalidad de controlar el movimiento de máquinas mediante la ejecución de código G, permitiendo el desarrollo de equipos de CNC Routers, impresoras 3D, CNC Láseres, Cortadoras de estereofón y más.

GRBL se encuentra desarrollado para trabajar principalmente con el chip Atmega328p. Sus archivos de programa se encuentran escritos utilizando código C

y dividido en librerías nombradas según el aspecto que trabaja cada una de estas. [14]

Al ser un programa de código abierto existen diferentes versiones del mismo destinadas a trabajar con diferentes chips o funciones, como es el caso del Mega-GRBL que se encuentra publicado por la organización Gnea, que se dedican a modificar el GRBL original para obtener un archivo de compatible con el chip Mega 2560 y el caso del programa controlador trabajado y publicado por el usuario francés Gauthier Brière (fra589) denominado GRBL-Mega-5X, que se deriva del proyecto Mega-GRBL, este permite trabajar con 6 motores de ser necesarios. [15]



Figura 2-9. Logo del *programa controlador* GRBL-Mega-5X. Fuente: [15]

El GRBL-Mega-5x su escritura en código C y su estructura se encuentra desarrollada en las mismas librerías del GRBL original. Estas librerías se denominan:

- Config
- Coolant_control
- Cpu_map
- Defaults
- Eeprom
- Grbl
- Jog
- Limits
- Main
- Motion_control
- Nuts_bolts
- Planner
- Print
- Probe
- Protocol
- Report
- Serial
- Settings
- Sleep
- Spindle_control
- Stepper
- System

2.7 Norma IEC 60825

Como parte de la seguridad y calidad del proyecto, se tomó como base la aplicación de una normativa con respecto al uso de dispositivos láser. La norma estándar internacional emitida por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), corresponde a la IEC 60825 sobre la seguridad de productos láser.

En esta sección se pretende recopilar la información más relevante de la norma IEC 60825-1 sobre la seguridad de productos que trabajan con láser, que abarca la clasificación, los requisitos y guía de usuario.

La norma mencionada especifica una clasificación que depende de características y aplicaciones que se le da al láser. Esta clasificación que la norma establece es la que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2-1. Clasificación láser según la norma IEC 60825.

Clasificación	Descripción
Clase 1	Láseres que son seguros en condiciones de funcionamiento visibles.
Clase 1M	Láseres que emiten en el rango de longitud de onda de 302,5 nm a 4000 nm que son seguros bajo condiciones de funcionamiento visibles, pero que puede ser peligroso si el usuario emplea la óptica dentro del haz. Una exposición momentánea sin protección únicamente por 0,25 s, es decir visualización accidental en el rango de 400 nm a 700 nm de longitud de onda.
Clase 2	Láseres que emiten radiación visible de longitud de onda entre 400 nm a 700 nm, donde la protección para los ojos se proporciona normalmente mediante respuestas de molestias, incluido el reflejo de parpadeo. Una exposición momentánea sin protección únicamente por 0,25 s, es decir visualización accidental. Se requiere una protección adecuada bajo condiciones de visualización dentro del haz.
Clase 2M	Láseres que emiten radiación visible de longitud de onda entre 400 nm a 700 nm, donde la protección para los ojos se

	proporciona normalmente mediante respuestas de molestias, incluido el reflejo de parpadeo. Una exposición momentánea sin protección únicamente por 0,25 s, es decir visualización accidental. Sin embargo, la visualización de la salida puede ser más peligrosa si el usuario emplea ópticas dentro del haz.
Clase 3R	Láseres que emiten en el rango de longitud de onda de 302,5 a 10^6 nm donde la visualización directa es potencialmente peligrosa, pero el riesgo es menor que los láseres de Clase 3B, por lo que se aplican menos requisitos de fabricación y medidas de control para el usuario.
Clase 3B	Láseres normalmente peligrosos cuando se producen una exposición directa al haz. La visualización de reflejos difusos es normalmente segura.
Clase 4	Láseres que también son capaces de producir reflejos difusos peligrosos. Puede causar lesiones en la piel y también podría ocasionar peligros de incendio.

[16]

La norma menciona en la sección dos los siguientes requisitos de fabricación como características de seguridad dependiendo a la clase en la que está clasificada el producto.

- Carcasa protectora:

La norma establece que los productos producidos que utilicen láser deben de tener una carcasa de protección, con el fin de que se evite el acceso, además, menciona que el acceso humano cuando es necesario para la operación de las funciones del producto se puede exceptuar. [16]

Se indica [16] que la carcasa que tenga cualquier producto que utilice una fuente láser, debe estar aseguradas de forma en la extracción de las piezas que componen el producto requieran el uso de herramientas.

- Cierre remoto:

Cuando se opera un láser con clasificación 3B o 4 el sistema debe incorporar un sistema que cuando el cierre se encuentre en abierto, la radiación que genere el láser no debe sobrepasar lo especificado para la Clase 1M o Clase 2M. [16]

- Control por llave:

El sistema de control del láser en casos en donde se clasifique como Clase 3B y Clase 4, debe incorporar una llave de operación extraíble. [16]

- Controles:

En la norma se expresa que cuando se tiene una máquina láser de Clase 3R, 3B o Clase 4, se debe tener controles para ajustes y operación, pero que se encuentren en una ubicación en donde utilizarlos no requiera una posible exposición del láser. [16]

- Parada de haz:

Se indica que en los sistemas que clasificados en la Clase 3B y Clase 4 se debe tener un medio que permita la parada del haz o un atenuador, además del interruptor de la fuente de energía láser, el conector de alimentación del sistema o el control por llave. [16]

- Visualización:

En este apartado la norma define que cualquier óptica de visualización, ventana de visualización o pantalla deberá ocasionar una atenuación suficiente para no permitir una afectación visual al ser humano con el haz del láser. [16]

- Advertencias:

La norma menciona que en el caso en el que se tenga un sistema láser de Clase 3R donde la longitud de onda del láser que determine el fabricante vaya por debajo de los 400 nm y por encima de los 700 nm y los sistemas Clase 3B y Clase 4 se dará una advertencia audible o visible cuando está encendido o si el sistema de láser pulsado posee bancos de condensadores que no se han cargado o descargado. [16]

Entre las advertencias que establece la norma, se encuentra el uso de un debido etiquetado para informar y advertir al usuario de que corresponde de un producto que trabaja con láser. Estas etiquetas deben ir fijadas de forma permanente, legibles y que resulten visibles, además deben de realizarse con bordes, símbolos y texto de color negro con un fondo de color amarillo. En el caso que el tamaño del producto no permita el debido etiquetado, se debe incluir una etiqueta o en el paquete. [16]

Como parte de la seguridad ocupacional y control de riesgos, la norma menciona diferentes aspectos según la clase a la que pertenece el láser, en la Tabla 2-1, se muestra un resumen según la clase de las consideraciones.

Tabla 2-2. Consideraciones de seguridad y control de riesgos según la clase dadas por la norma IEC 60825-1

Clasificación	Descripción
Clase 1M	<ul style="list-style-type: none"> - No se considera peligroso una exposición momentánea de 0,25 s entre el rango de longitud de onda de los 400 nm a 700 nm, es decir, visualización accidental. - Aumenta el riesgo ocular al utilizar ayudas ópticas para la visualización como binoculares.
Clase 2	<ul style="list-style-type: none"> - No se considera peligroso una exposición momentánea de 0,25 s entre el rango de longitud de onda de los 400 nm a 700 nm, es decir, visualización accidental.
Clase 2M	<ul style="list-style-type: none"> - No se considera peligroso una exposición momentánea de 0,25 s entre el rango de longitud de onda de los 400 nm a 700 nm, es decir, visualización accidental. - Aumenta el riesgo ocular al utilizar ayudas ópticas para la visualización como binoculares.
Clase 3R	<ul style="list-style-type: none"> - Aumenta el riesgo ocular al utilizar ayudas ópticas para la visualización como binoculares.

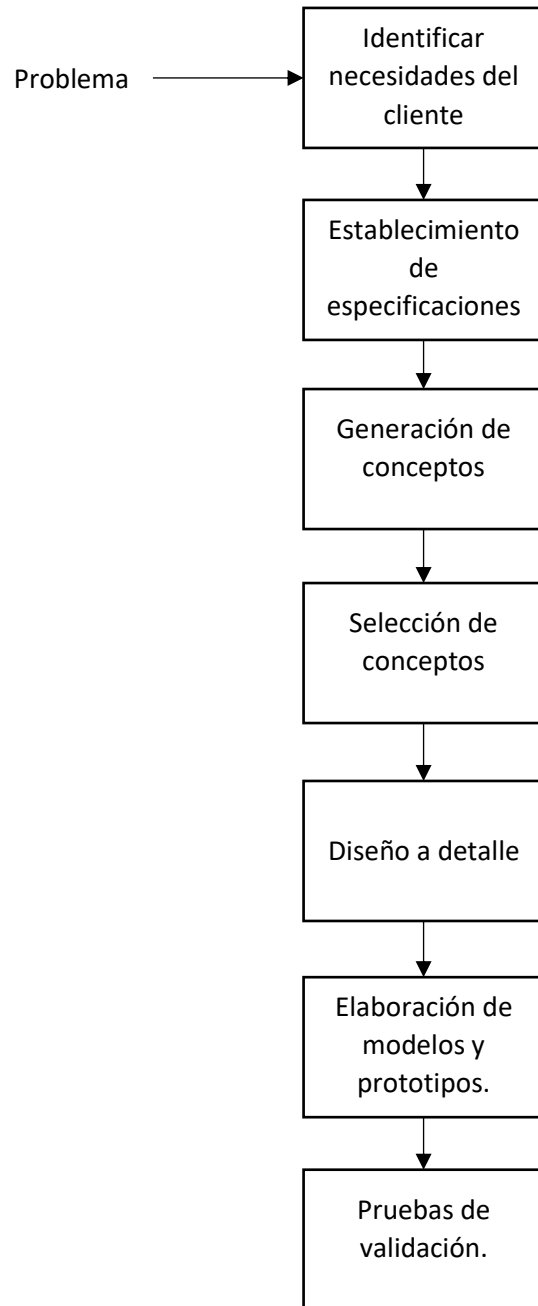
<p>Clase 3B</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Potencialmente peligrosos si se observa un haz directo o reflejo especular con el ojo desprotegido. - El láser debe utilizarse en un área controlada. - Cuidados para evitar reflejos especulares. - El láser debe terminarse cuando sea posible al final de su trayectoria, mediante un material difuso, de tal color y reflectividad que permita el posicionamiento del haz, pero minimizando reflexiones. - La visualización segura sin protección de reflejos para un láser que trabaje en el rango visible es de una distancia mínima de 13 cm entre la pantalla y la córnea con un tiempo de visualización máximo de 10 s. - Las entradas a las áreas deben estar señalizadas.
<p>Clase 4</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Las trayectorias de los haces del láser deben estar siempre cuando sea posible cerradas. - La operación debe ser remota, evitando que el personal deba operar físicamente el entorno donde está el láser. - Una buena iluminación de la habitación es importante, con ayuda de colores de paredes claros y difusos. - Utilización de gafas o filtros de protección.

[16]

3 Metodología

La metodología seguida durante la realización de este proyecto se basa principalmente en el desarrollo del concepto, debido a que el alcance definido para el trabajo corresponde a un proceso de diseño y pruebas de validación.

Siguiendo el proceso de diseño de ingeniería que se establece en [17] el cual el desarrollo del concepto se plantea mediante el denominado “*proceso frontal*”, que consiste en una serie de actividades que se relacionan entre sí, actividades que se muestran en la Figura 3-1, definidas en base al alcance de este proyecto.



*Figura 3-1. Proceso de diseño seguido durante el desarrollo del proyecto.
Elaboración propia*

El apartado de la Identificación de las necesidades consistió en una entrevista de conocimiento del problema y de las necesidades del cliente del proyecto, en donde se realizó un análisis para establecer la importancia que posee cada uno de los aspectos determinados.

Posteriormente, se definieron las especificaciones donde “se denota la descripción precisa de lo que el producto tiene que ser” [17]. Este consistió en la determinación de la importancia relativa que posee cada una de las necesidades del cliente y a partir de ellas se elaboró una lista mediante métricas que sean medibles y mesurables. Importante aclarar, que este apartado a pesar de que no determina el diseño del proyecto permite mantener una base de como cubrir las necesidades especificadas por el cliente Figura 3-1.

Durante el apartado de la generación del concepto, se recurrió a un proceso de investigación bibliográfica y mediante una búsqueda externa a expertos que se dedican al área, a partir de esto se definieron a subproblemas más pequeños que son necesarios diseñar y así lograr realizar propuestas de elementos que permitan solucionarlos. Basándose en el proceso mencionado en Figura 3-1.

A partir de los conceptos obtenidos durante la generación de conceptos según el subproblema, se realizaron tablas de ventajas y desventajas como método de comparación de las propuestas con su respectivo análisis, además, mediante matrices de selección utilizando métricas de calificación, se obtuvo la selección de los elementos que permiten solucionar cada subproblema de forma adecuada.

A partir del concepto seleccionado, se realizó el proceso de diseño a detalle que corresponde al desarrollo de la solución dividida en 3 subproblemas que corresponde al diseño de un modelo mecánico de los ejes y la carcasa, diseño eléctrico que permite el control mediante botonera y el movimiento y el diseño lógico del código a implementar para el funcionamiento manual.

Como último paso, corresponde a la validación del diseño realizado, para este apartado se procedió por la manufactura de un prototipo funcional de los ejes para comprobar el funcionamiento por medio de pruebas de movimiento y grabado. También se efectuó una muestra del modelo realizado y comprobación de resultados mecánicos. Además, mediante programa computacional se verificó el debido funcionamiento de la botonera y del código implementado para el control manual.

3.1 Identificación de requerimientos y establecimiento de especificaciones

A partir de entrevistas al dueño de la empresa Hartmade® y un análisis de la información suministrada, se determinaron una serie de requerimientos que están presentes en el problema que deben ser abarcadas en la solución.

Con base en las necesidades iniciales identificadas y mostradas en la sección 1.2, se realizó un análisis de cada una y se define la importancia relativa para el sistema y las posteriores etapas de generación y selección de concepto. Esta corresponde a la información mostrada en la Tabla 3-1.

La importancia relativa está definida de 1 a 5 donde un valor igual a 1 corresponde a un requerimiento que no es crucial, un valor 3 es un requerimiento de necesidad intermedia que es deseable, pero si no está no afecta el resultado del proyecto y un valor igual a 5 es un requerimiento crítico e indispensable.

Tabla 3-1. Especificación de requerimientos y su importancia relativa al diseño del sistema.

Número	Requerimiento	Importancia
1	Que permita un transporte fácil y seguro.	5
2	Permite ser cargada con dos manos.	3
3	Tamaño de trabajo mínimo de 50 x 25 cm.	5
4	Portabilidad.	5
5	Capaz de realizar el grabado.	5
6	Comunicación computadora-máquina vía conexión por cable.	5
7	Se pueda observar el proceso durante la operación.	4
8	Distancia del láser modificable.	4

9	Aspecto que inspire orgullo	2
10	Fácil mantenimiento.	4
11	Bajo costo.	5
12	Precisa.	5

A partir de los requerimientos definidos se determinaron una serie de métricas que permiten reflejar, de forma directa a como sea posible, satisfacer las necesidades del cliente mediante especificaciones que sean más precisas y medibles. [17]. En la Tabla 3-2 se muestra la lista de métricas definidas.

Tabla 3-2. Lista de métricas y su importancia relativa.

Métrica número	Número de requerimiento	Métrica	Importancia	Unidades
1	1, 2, 4	Masa final de la estructura	5	Kg
2	2, 4	Tamaño final de la estructura externa	4	cm
3	3	Tamaño del área de trabajo	5	cm
4	5	Potencia del láser	5	W
5	6	Comunicación por cable a la PC	5	Binario
6	7	Tamaño de la estructura externa dedicado a la inspección visual del proceso	4	cm
7	8	Altura variable del láser	4	cm
8	9	Aspecto que inspire orgullo	2	Subj
9	10	Tiempo al realizar mantenimiento	3	Minutos
10	10	Costo del mantenimiento	4	Colones
11	11	Costo de la manufactura	5	Colones
12	12	Precisión	5	mm

A partir de las métricas definidas en la Tabla 3-2, se definieron valores objetivo con el fin de obtener valores meta a la hora de generar el concepto y principalmente al seleccionar el concepto adecuado. En la Tabla 3-3 que se muestra a continuación se muestra los valores mencionados.

Tabla 3-3. Valores objetivos por métrica.

Métrica número	Métrica	Unidades	Valor objetivo
1	Masa final de la estructura	Kg	< 20
2	Tamaño final de la estructura externa	cm	≤ 80 x 70
3	Tamaño del área de trabajo	cm	≥ 50 x 25
4	Potencia del láser	W	> 3
5	Comunicación por cable a la PC	Binario	Sí
6	Tamaño de la estructura externa dedicado a la inspección visual del proceso	cm	≥ 45 x 20
7	Altura variable del láser	cm	≥ 5
8	Aspecto que inspire orgullo	Subjetivo	≥ 3
9	Tiempo al realizar mantenimiento	Minutos	45
10	Costo del mantenimiento	Colones	5 000
11	Costo de la manufactura	Colones	350 000
12	Precisión	mm	< 1

3.2 Generación y selección del concepto

En la generación del concepto es de suma importancia conocer el proceso general que debe realizar la solución a desarrollar. En la Figura 3-2 se muestra una representación tipo “caja negra” de las partes del funcionamiento general del proceso de corte y grabado mediante láser en una máquina CNC.

En la figura se muestra que partir de una imagen o un diseño realizado previamente se configura los parámetros de velocidad y potencia para la generación del código en un software especializado generador de código G. Posteriormente, la alimentación de la máquina láser energiza todos los componentes, y quedando a la espera de recibir el código G. Una vez dado inicio, se envía de forma serial el código G a la placa base que verifica el estado correcto de los sensores e inicia el proceso

de grabado, con la activación de los motores y el láser, obteniendo como resultado al final del proceso, el material ya terminado con el grabado seleccionado.

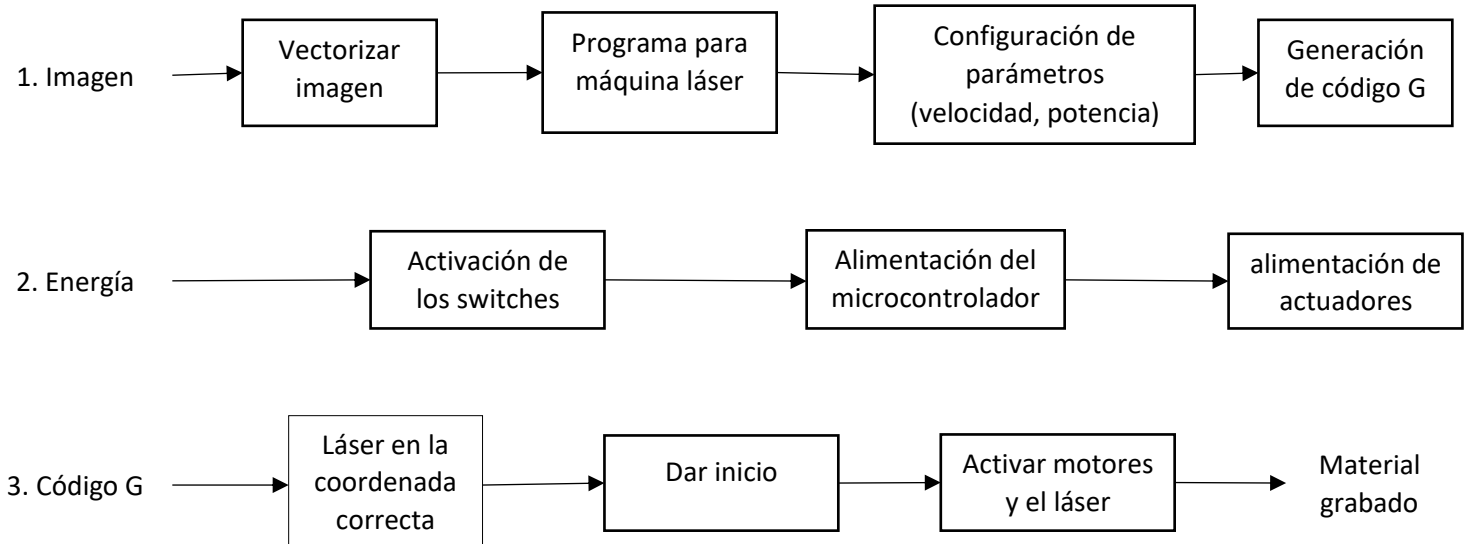


Figura 3-2. Diagrama general del proceso. Elaboración propia.

3.2.1 División del problema

“Muchos retos de diseño de productos son demasiado complejos para resolverse como un solo problema y se pueden dividir en varios subproblemas más sencillos” [17]. Por esta razón, para abarcar de mejor forma el problema se realizó la división en subproblemas y cada uno de estos subproblemas en elementos por diseñar con el fin de obtener un análisis más específico de los problemas. Por lo tanto, los subproblemas obtenidos son los siguientes:

- Subproblema de diseño mecánico.
 - o Transmisión de potencia.
 - o Deformaciones
 - o Material.
 - o Aspecto.
- Subproblema de diseño eléctrico.

- Motores.
- Placa de desarrollo.
- Láser.
- Fuente.
- Subproblema de diseño lógico (programación).
 - Código base.

3.2.2 Búsqueda externa

Como se mencionó anteriormente en el capítulo de la metodología, parte de la generación del concepto corresponde a una búsqueda externa de técnicos que estén involucrados en el trabajo con máquinas láser para obtener asesoría para aumentar el conocimiento del proceso y del sistema. Las fuentes consultadas corresponden a personal de laboratorios de universidades como el LAIMI del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ProtoLab de la Universidad de Costa Rica y el FabLab de la Universidad Veritas que poseen experiencia en el manejo del corte y grabado con láser. Además, de visita a la empresa y muestra del proceso e inspección de la máquina.

Los aspectos que se destacan de las asesorías son las siguientes:

- Aspectos mecánicos:
 - Utilización de motores a pasos.
 - Transmisión de potencia por bandas de caucho o flechas de transmisión al mismo eje paralelo.
 - Las portables son abiertas, sin sensores y pantallas.
 - Áreas de trabajo muy pequeñas, las portables.
 - Comúnmente de metal o aluminio.
 - La mesa es estática.
 - Utilización de rieles lineales de baja fricción.
 - Eje Z hay mecánico o eléctrico.
- Aspectos eléctricos

- Comúnmente utilización de Arduino Uno con Shield CNC o tarjetas de la empresa que las producen.
- Poseen botón de paro de emergencia.
- Las de gran tamaño comúnmente utilizan láser por CO2.
- Buen manejo de cables.
- Botonera para control manual.
- Software:
 - Programa en PC de la empresa de donde provienen.
 - Control por computadora.
 - Utilización de GRBL, programa controlador dedicado para movimientos CNC Routers y láser.

3.2.3 Subproblema de diseño mecánico

Para el diseño mecánico general del sistema corresponde a una estructura que permita el movimiento con 3 grados de libertad denominados como Eje X, Eje Y y Eje Z.

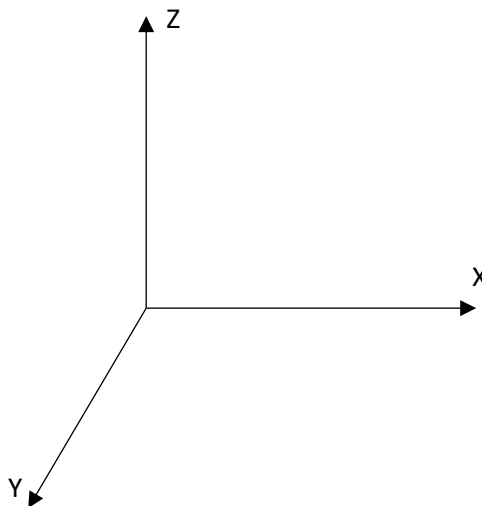


Figura 3-3. Dirección de cada uno de los ejes del sistema. Elaboración: Propia

3.2.3.1 Selección de la base.

La base corresponde a la sección en donde las piezas que son trabajadas reposan durante el tiempo que dure la tarea de grabado.

Entre las alternativas de solución planteadas para el diseño de la base son las siguientes:

- Base móvil en dirección Y o X.
- Base fija.
- Base móvil en dirección Z.

En la Tabla 3-4, se muestra la matriz de selección empleada para las alternativas de solución según las métricas mencionadas a continuación, estas se encuentran evaluadas en el rango de 1 a 5, siendo 1 una condición que no es favorable para el proyecto, 3 una condición con un beneficio intermedio para el proyecto y 5 una condición adecuada o muy beneficiosa para el proyecto. Cada una de las métricas para seleccionar como es la base de la máquina son las siguientes:

- Tamaño requerido: corresponde a como la solución afecta al tamaño final de la estructura externa a la hora de ser implementada. Siendo un valor igual a 1 si la propuesta de solución implica que el tamaño de la estructura requerido para implementarlo sea muy elevado, es decir, aumentar el tamaño final a un valor cercano o mayor al 75% a las dimensiones del área de trabajo, 2 en el caso que sea un 60% a 75%, 3 en el caso de 45% a 60%, un valor de 4 en el rango de 45% a 30 % y en el caso que sea de ser otorgado un valor de 5 corresponde que la solución que requiere aumentar el tamaño de la estructura en valores de 0% a 15% para ser implementado.
- Costo: se relaciona al costo necesario tanto en aspectos mecánicos como electromecánicos para el movimiento de cada uno de los sistemas, siendo un valor de 1 un costo mayor a 30 mil colones de implementación por los materiales, un valor de 2 para el rango de los 30 mil a los 22,5 mil colones, valor de 3 para el rango de 22,5 mil a los 15 mil colones , un valor de 4 para

el rango de los 15 mil a los 7,5 mil colones y un valor de 5 un costo de 7,5 mil a los 0 colones para implementación entre las propuestas.

- Sujeción requerida de las piezas: debido al movimiento de la base, es necesario la implementación de un sistema de sujeción ya que puede moverse la pieza a trabajar de su sitio, por lo que con un valor de 1 indica que el sistema requiere implementar de forma obligatoria un sistema de sujeción de la pieza a trabajar de 4 puntos, aspecto que se traduce a tiempo y dinero, un valor de 2 para el caso que requiere 2 puntos de sujeción, un valor de 3 en el caso que sea una sujeción sencilla un punto de sujeción, 4 para el caso que la sujeción en ciertos casos puede no ser requerida y un valor de 5 indica que la pieza simplemente reposa en la base y no requiere de elemento de sujeción, aspecto beneficioso.
- Altura de la pieza a trabajar: Con un valor igual a 1 se indica que el sistema no es capaz de modificar su altura por lo que limita la altura de la pieza, un valor de 2 para el caso que la altura posible es de 12,5 mm a 25 mm, un valor de 3 para el caso que la altura posible está en el rango de 25 mm a 37,5 mm, un valor de 4 para el caso que la altura posible está en el rango de 37,5 mm a 50 mm, con un valor igual a 5 el sistema da más de 50 mm con facilidad siendo beneficioso para el usuario por la gran variedad de altura de piezas que puede trabajar.

En la Tabla 3-5, se muestra el resultado obtenido de la matriz de selección.

Tabla 3-4. Matriz de selección del diseño de la base.

Sistema	Tamaño requerido	Costo	Sujeción de las piezas	Altura de piezas a trabajar
Base móvil en dirección Y o X	1	3	2	3
Base fija	4	4	5	4
Base móvil en dirección Z	3	2	5	5

A partir de la Tabla 3-4 se muestra el resultado en forma de porcentaje en la Tabla 3-5. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 20 puntos.

Tabla 3-5. Resultado de la selección del diseño de la base.

Sistema	Total	Porcentaje
Base móvil en dirección Y o X	9	45 %
Base fija	17	85%
Base móvil en dirección Z	15	75%

Como se muestra en la Tabla 3-5, la alternativa de solución más viable corresponde a utilizar la base fija. Debido a que las otras alternativas presentaban un tamaño de implementación mayor debido al desplazamiento, como es el caso si la base móvil en dirección Y o X, además, el costo de implementación se incrementa a causa de la necesidad implementar más elementos como lo son motores, elementos de transmisión de potencia y elementos mecánicos estructurales especialmente en el sistema de movimiento en dirección Z, y por último, al ser la base fija, el riesgo de que la pieza que está siendo trabajada se mueva se reduce.

3.2.3.2 Transmisión de potencia

La máquina se compone de 3 grados de libertad, eje X, eje Y y eje Z como se mencionó anteriormente, por lo que se muestra en esta sección, un análisis para determinar la forma en cómo se transmite la potencia rotacional de los motores a un movimiento lineal y obtener la alternativa de solución más viable.

Para el movimiento se determinaron 3 alternativas para solucionar el problema de transmisión de la potencia, estas alternativas son las siguientes:

- Varilla roscada.
- Sistema de piñón y cremallera.
- Sistema de banda de caucho y polea.

En la Tabla 3-6 se muestra una comparación de ventajas y desventajas presentes de cada una de las alternativas.

Tabla 3-6. Sistemas para la transmisión de potencia.

Sistema	Ventaja	Desventaja
Varilla roscada.	<ul style="list-style-type: none"> • Muy buena precisión. • Baja fricción. • Silencioso. • Larga vida útil. • Frecuencia de mantenimiento baja. 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad intermedia. • Necesita lubricación. • Costo intermedio en caso de ser necesaria la manufactura. • Longitud de la varilla limitado a la capacidad de manufactura.
Piñón y cremallera	<ul style="list-style-type: none"> • No hay límite de longitud. • Altas velocidades. • Larga vida útil. • Frecuencia de mantenimiento baja. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruidoso. • Vibraciones. • Costo debido a tolerancia para evitar la holgura. • Necesita de lubricación. • Costo intermedio.
Banda de caucho y polea	<ul style="list-style-type: none"> • Las bandas son de bajo costo. • Transmisión de potencia a grandes distancias. • Velocidades altas. • Silencioso. • No requiere lubricación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de tensión con frecuencia. • Mantenimiento correctivo o preventivo en periodos cortos. • No adecuado para altos torques. • Posibilidad de que se deslice la banda. • No recomendable en movimiento vertical. • Genera tensión en los árboles de los motores.

En la Tabla 3-7, se muestra la matriz de selección empleada para las alternativas de solución según las métricas mencionadas a continuación, estas se encuentran evaluadas en el rango de 1 a 5, siendo 1 una condición que no es favorable para el proyecto, 3 una condición con un beneficio intermedio para el proyecto y 5 una condición adecuada o muy beneficiosa para el proyecto. Cada una de las métricas para seleccionar la forma de transmisión de potencia son las siguientes:

- Costo: Corresponde al costo relacionado a la adquisición o en caso de manufactura del sistema de transmisión de potencia, siendo un valor de 1 un costo mayor entre las propuestas, 2 un costo alto, pero no desmedido entre las propuestas, 3 un costo intermedio entre las propuestas, 4 un costo bajo entre las propuestas y 5 un costo nulo.
- Mantenimiento: Relacionado con la frecuencia y la facilidad para dar mantenimiento al sistema de transmisión de potencia, evaluando con un valor de 1 que la propuesta de solución requiere constante intervención de mantenimiento (diario), 2 requiere mantenimiento o ajuste semanal, 3 es necesario estar pendiente y ajustar cada 2 semanas, 4 un ajuste de mantenimiento cada 3 semanas y 5 que el mantenimiento es muy poco frecuente (mensual) y sencillo.
- Disponibilidad: Corresponde a la disponibilidad en el mercado para ser adquirido, manufacturado o adquirir repuestos, donde un valor de 1 toma en consideración que la propuesta de solución no se encuentra en el mercado y debe ser manufacturada, un valor medio, es decir, un valor de 3 significa que los repuestos o el sistema completo se encuentra en el mercado costarricense pero generalmente con limitadas existencias y un valor de 5 está relacionado con la gran facilidad de encontrar el sistema completo o repuestos en el mercado costarricense.
- Precisión: Se debe a que los elementos de transmisión de potencia presentan espacios muertos, roces o deslizamientos que pueden afectar la precisión del sistema. El rango de calificación de 1 a 5 presenta las siguientes condiciones, con un valor igual a 1 se da si la precisión es mala y presenta mucho juego por el espacio muerto o deslizamientos, 3 a la

propuesta de solución con espacio muerto o posibilidad de presentar deslizamiento intermedio y un valor igual a 5 a propuesta de solución de alta precisión.

- Implementación: Relacionado a las complicaciones que puede presentar el sistema a la hora de ensamblar o poner a trabajar el sistema. Siendo una calificación con un valor igual a 1 un sistema que requiere múltiples consideraciones importantes para el funcionamiento, múltiples elementos extra y calibraciones, 2 un sistema que requiere consideraciones de ajuste importantes antes de poner a trabajar, 3 requiere de elementos y consideraciones antes de poner a trabajar y calibrar, 4 simple de funcionar, pero requiere ajustar un elemento con facilidad y un valor de 5 si es un sistema sencillo, es decir, sistema simple y funciona sin alguna consideración de importancia, solo de montar y está listo para funcionar.

Tabla 3-7. Matriz de selección del sistema de transmisión de potencia.

Sistema	Costo	Mantenimiento	Disponibilidad	Precisión	Implementación
Varilla roscada	3	5	3	4	4
Piñón y cremallera	1	5	1	3	5
Banda de caucho y polea	4	3	4	4	3

A partir de la Tabla 3-7 se muestra el resultado en forma de porcentaje en la Tabla 3-8. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 25 puntos.

Tabla 3-8. Resultado de la selección del sistema de transmisión de potencia.

Sistema	Total	Porcentaje
Varilla roscada	20	80%
Piñón y cremallera	16	64%
Banda de caucho y polea	19	76%

En la Tabla 3-8 se muestra que la alternativa de solución más factible para la transmisión de potencia para los ejes corresponde al sistema en donde se utilice una varilla roscada que permita la transformación del movimiento rotacional del motor a un movimiento traslacional.

Este sistema de transmisión de potencia seleccionado será utilizado en cada uno de los ejes, por lo que no fue necesario la realización de una matriz de selección de cada eje, debido a que:

- Para el eje Z, un sistema de banda de caucho y polea, se descarta debido a que como se mencionó en la Tabla 3-6, este no es recomendable para un movimiento vertical, ya que la banda de caucho debería soportar el peso del eje, por lo que quedarían dos alternativas de solución en donde la opción más viable se muestra en la selección realizada en la Tabla 3-7.
- En el caso del eje X y Y, ambos sistemas presentan una misma naturaleza de movimiento horizontal y con condiciones similares, donde una diferencia corresponde a que el eje X es el eje que presenta mayor distancia por recorrer, por lo que la selección viable para el eje X es igualmente factible para el eje Y, por lo que se toma como adecuado tomar una sola matriz de selección para ambos ejes.

Para el caso del eje X y Y debido a que estos ejes corresponden a los que realizan el movimiento para realizar el grabado, se seleccionó la utilización de varillas roscadas de velocidad T8 con 4 hilos y 2 mm de paso, lo que permite un avance de 8 mm por vuelta. En el caso del eje Z, la tarea a implementar es de colocación del láser y después se mantiene fijo durante el trabajo, por lo que se optó por la selección de una varilla roscada M8 de 1 hilo y 1,5 mm de paso, esto permite un avance de 1,5 mm por vuelta por lo que se considera una rosca lenta.

3.2.3.3 Materiales

Las alternativas de solución propuestas para el tema de los materiales que estarán presentes en la estructura del sistema de los 3 ejes (X, Y y Z) como además la carcasa, se tomó en cuenta materiales que presenten baja densidad por

cuestiones de la masa e inercia de la estructura, como también un tema del costo por presupuesto.

Tabla 3-9. Materiales para la estructura del sistema.

Material	Ventaja	Desventaja
Madera con tratamiento antinflama <ul style="list-style-type: none"> • Densidad 400 kg/m^3 	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de trabajar. • Absorbe vibraciones. • Ecológico. • Bajo costo. • Muy liviano. • Buena resistencia/peso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de barniz. • La resistencia al fuego al no tratarse. • Sensible a la humedad aun con tratamientos.
Aluminio 6061 <ul style="list-style-type: none"> • Densidad 2700 kg/m^3 	<ul style="list-style-type: none"> • Aislante térmico. • Durabilidad. • Resistente al fuego. • Fácil mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia de espesores disponibles en el mercado. • Mayor costo de manufactura. • Más denso con respecto a los demás candidatos.
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) <ul style="list-style-type: none"> • Densidad 1020 kg/m^3 	<ul style="list-style-type: none"> • Se trabaja con facilidad mediante impresión 3D • Resistente a impactos. • Resistente a la fatiga. • Buen acabado superficial. • Costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Punto vitreo a $105 \text{ }^\circ\text{C}$, aunque alta en comparación al PETG. • Se deforma al enfriarse durante la manufactura. • Descomposición con la luz ultravioleta.

		<ul style="list-style-type: none"> • Durante manufactura desprende gases nocivos para la salud.
Polietileno tereftalato con glicol (PETG) <ul style="list-style-type: none"> • Densidad 1270 kg/m³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Se trabaja con facilidad mediante impresión 3D • Buena durabilidad. • Presenta buena resistencia a esfuerzos. • Liviano. • Costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Punto vitreo 85 °C. • Descomposición con la luz ultravioleta. • Más flexible que el ABS.
Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA) <ul style="list-style-type: none"> • Densidad 1060 kg/m³ 	<ul style="list-style-type: none"> • Propiedades similares al ABS. • Resistencia a impactos. • Resistencia a la fatiga. • Resistencia a la luz UV. • Menor deformación al enfriarse durante la manufactura. • Temperatura vítrea 115 °C • Durabilidad en el tiempo. • Liviano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca disponibilidad en el mercado. • El precio comparado a los plásticos ABS es mayor. • Durante manufactura desprende gases nocivos para la salud.
Policarbonato (PC)	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura vítrea de 140 °C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de mayores consideraciones a la

<ul style="list-style-type: none"> • Densidad 1300 kg/ m^3 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al impacto. • Durabilidad Alta. • Resistencia a la luz UV. • Ideal cuando se trabajan cerca de una fuente de calor. 	<p>hora de la manufactura por impresión 3D, por lo que no cualquier máquina lo puede imprimir.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se deforma con facilidad al terminar la impresión. • Tiende a absorber humedad.
---	--	---

Fuente: [18], [19], [20]

A diferencia de las secciones anteriores, los valores para las métricas que se utilizaron en la Tabla 3-10 corresponde a un rango de 0 a 10 siendo el valor de 10 como el valor que muestra la mejor característica, debido a que por las múltiples alternativas el rango de 0 a 5 no permitió una caracterización adecuada.

En el rango de 1 a 10, siendo 1 una condición que no es favorable para el proyecto, 5 una condición con un beneficio intermedio para el proyecto y 10 una condición adecuada o muy beneficiosa para el proyecto. Las métricas establecidas con el fin de obtener la selección del o los candidatos para el tema del material a utilizar en aspectos estructurales de sistema según las alternativas propuestas son las siguientes:

- Masa: Se considera la densidad del material, debido que para la estructura de los ejes la masa influye en los momentos de inercia y el peso en las deflexiones de las vigas. En la Tabla 3-9 se muestran las densidades de los materiales propuestos, a partir de estos valores se evalúa con el rango de 1 a 10, siendo 10 un material poco denso entre las propuestas por lo tanto con menor masa siendo beneficioso para reducción de peso y 1 un material sumamente denso por lo que se obtendría mayor masa y por ende mayor peso.
- Costo: El aspecto del costo contempla tanto el aspecto del material, como el costo de manufactura de ser manufacturada la pieza en dicho material, este aspecto

afecta el presupuesto del proyecto. Se evalúo en un rango de 1 a 10 siendo un valor de 1 un costo excesivamente elevado, 5 un costo que se considera que no es alto, pero tampoco bajo, es intermedio por lo que puede mejorar y 10 un costo bajo que beneficia el presupuesto.

- Resistencia a la temperatura: A pesar de que el láser es un haz lineal localizado y que las emisiones de humo que se genera durante el grabado no son en grandes proporciones, es importante considerar que aun así el humo emanado aumenta la temperatura internamente, que puede afectar el estado del material. Por lo que se evalúa con un valor de 1 los materiales que no presentan una resistencia al calor, con 5 los materiales con un punto vitreo menores a 90 °C, pero mayores a 75 °C considerados que se encuentran en un punto intermedio y con 10 los que presentan un valor mayor a 160 °C
- Durabilidad: se considera la vida útil del material en general, la resistencia a los rayos UV, la resistencia a esfuerzos, golpes y humedad. En este aspecto con un valor de 1 se consideran los materiales frágiles, con 5 los materiales que presenten una robustez intermedia, pero con algún aspecto comprometa la durabilidad y con un valor de 10 al material que robusto que presente una vida útil considerablemente larga para esta aplicación.

En la Tabla 3-10, se muestra la matriz de selección empleada para las alternativas propuestas para la selección del material a utilizar, descartando a partir de las métricas mencionadas anteriormente.

Tabla 3-10. Matriz de selección del material estructural.

Material	Masa	Costo	Resistencia a la temperatura	Durabilidad
Madera con tratamiento antinflama	10	6	7	5
Aluminio 6061	4	3	10	10
Plástico ABS	8	8	6	6
Plástico PETG	7	7	5	5

Plástico ASA	8	7	7	7
Plástico PC	7	5	8	7

A partir de la Tabla 3-10, se muestra el resultado en forma de porcentaje en la Tabla 3-11. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 40 puntos.

Tabla 3-11. Resultado de la selección del material estructural.

Material	Total	Porcentaje
Madera con tratamiento antinflama	28	70 %
Aluminio 6061	17	42.5%
Plástico ABS	28	70%
Plástico PETG	24	60%
Plástico ASA	29	72.5%
Plástico PC	27	67.5%

A partir de la Tabla 3-10, se muestra el resultado en forma de porcentaje en la Tabla 3-11. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 40 puntos. Tabla 3-11, el material que obtuvo una mayor puntuación corresponde al plástico Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA). Los materiales plásticos que obtuvieron resultados muy cercanos corresponden al plástico ABS y al plástico PC.

Como se mencionó en la Tabla 3-9, el ASA posee propiedades muy similares al ABS, con la diferencia de que su punto vítreo es más alto por lo que tiene la característica de resistir mejor a temperaturas más altas y no presenta degradación por la luz ultravioleta, tomando en cuenta las demás propiedades que comparte con el ABS, corresponde a un material apto como solución.

El plástico PC corresponde a un fuerte candidato, pero se consideró aspectos como el costo, un valor de densidad mayor y la particularidad de que tiende a

absorber humedad por lo que al ser una máquina de precisión puede deformarse con el tiempo.

La madera con un tratamiento con un barniz antífama es un material que obtuvo un valor cercano al plástico ASA, pero durabilidad en el tiempo, ya que es un material muy blando y a pesar de que se le realice tratamientos de secado y sellado, tiende a deformarse ligeramente por la absorción de humedad de forma natural, por lo que en temas de precisión es un aspecto por considerar tal y como se mencionó con el plástico PC.

Como se mencionó, la madera en la matriz de selección obtuvo un puntaje de selección cercano al plástico ASA por lo que por esta razón y como posee una baja densidad por tema de masa total, el aspecto visual agradable debido al acabado, el tratamiento antífama permite mejorar la seguridad ya que realiza un comportamiento de resistencia al fuego y además ignífugo y tomando en cuenta que es un material ecológico, se consideró utilizarlo como parte de la carcasa, donde la carcasa no estará relacionada con el funcionamiento normal del sistema por lo que es un candidato factible.

3.2.3.4 Aspecto estético

En la Tabla 3-1 se define como parte de las necesidades, el realizar un diseño atractivo que inspire orgullo. Como elemento estético, la elección de utilizar madera como parte de la carcasa se puede considerar como un elemento que brinda un aspecto atractivo a la estructura, ya que el color y diseño que por sí sola que posee la madera resulta atractivo a la vista de las personas.

Tomando en cuenta el enfoque ambiental y al ser Hartmade® una empresa costarricense localizada en un territorio rural, se tomó la decisión de seleccionar como concepto del aspecto estético el realizar un diseño que permita visualizar la idiosincrasia del país; un país que posee muchas zonas verdes y con lugares llenos de elementos característicos, esto plasmado en las paredes de la carcasa como elemento decorativo que además permite seguir con la temática de la empresa.

3.2.4 Subproblema diseño eléctrico.

En el subproblema de diseño eléctrico, se tomó a consideración los elementos que permiten el movimiento, control y funcionamiento del sistema de grabado a partir de conectividad con una computadora.

3.2.4.1 Motores

En cada uno de los ejes que compone el sistema es necesario la colocación de un motor que permita el desplazamiento del carrito que soporta el láser. Estos motores deben responder a cambios de direcciones y un trabajo coordinado para poder realizar la tarea de grabado.

Los motores seleccionados para la alternativa de solución corresponden a motores de pequeño tamaño y eléctricos, por lo que las propuestas son las siguientes:

- Servomotor de rotación continua.
- Motor a pasos.
- Motor DC.

En la Tabla 3-12, se muestra cada uno de los tipos de motores propuestos como alternativa de solución y una comparación de ventajas y de desventajas que posee cada uno de ellos.

Tabla 3-12.. Comparación de ventajas y desventajas según el tipo motor.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Servomotores de rotación continua	<ul style="list-style-type: none">• Poca masa.• Potenciómetro de calibración.• Tamaño pequeño.• Mantiene el torque en reposo.• Altas velocidades.	<ul style="list-style-type: none">• Respuesta no lineal.• Necesidad de un encoder.• Vibraciones.

Motores a pasos	<ul style="list-style-type: none"> • Su posición puede ser controlada sin necesidad de encoders a velocidades bajas. • No es requisito un lazo de retroalimentación. • Mantiene el torque en reposo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pesado. • Requiere de controlador para reducir la cantidad de salidas. • A velocidades altas se pierden pasos.
Motores DC	<ul style="list-style-type: none"> • Altas velocidades. • Par de giro alto. • Mayor eficiencia. • Velocidad regulable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de frenos • Requiere lazo de retroalimentación para un debido control. • No es muy preciso. • Requiere de encoders para saber su posición.

En la Tabla 3-13, se muestra la matriz de selección empleada para las alternativas de solución según las métricas que se mencionan a continuación, estas se encuentran evaluadas en el rango de 1 a 5, siendo 1 una condición que no es favorable para el proyecto, 3 una condición con un beneficio intermedio para el proyecto y 5 una condición adecuada o muy beneficiosa para el proyecto. Cada una de las métricas para seleccionar la opción más viable son las siguientes:

- Control: Se consideró la capacidad que posee el motor para ser controlado su movimiento y precisión sin elementos externos. Por lo que se evalúa con un rango de 1 a 5, donde 1 es un motor que no posee control de ningún aspecto, un valor de 2 a los motores que necesiten múltiples elementos para el control y posee al menos una variable fácil de controlar, valor de 3 a un motor que necesita conexiones, elementos y código para el control, 4 cuando requiere de un elemento y código para el control y un valor igual a 5 un motor que el control es sencillo y sin necesidad de elementos externos únicamente con el código.

- Implementación: Se tomó en cuenta con respecto a las demás alternativas los elementos necesarios extras para su implementación. Se evalúa en un rango de 1 a 5, siendo 5 el caso en el que el motor no necesita ningún componente para su funcionamiento, valor de 4 para el caso donde se requiere 1 componente además del motor, un valor de 3 para el caso que se requiere más de 2 a 4 componentes para el funcionamiento, un valor de 2 para el caso que requiere 5 a 7 elementos y 1 el caso en el que requiere de múltiples elementos para poder que funcione para el proyecto de forma adecuada.
- Costo: El costo del motor y de implementación total del motor, con base a esto se evalúa con un valor de 1 un costo elevado de implementación por los materiales y el motor que ronda los 25 mil o más, valor de 2 para el caso que el costo sea de 20 a 25 mil colones, un valor de 3 en el caso que el costo sea de 15 mil a 20 mil colones, valor igual a 4 en el caso que el motor cueste entre 10 a 15 mil colones y un valor de 5 un costo mínimo o nulo de implementación y compra entre las propuestas.
- Masa: La masa que posee el motor ya que influye en la deflexión de las vigas y la inercia del sistema. Se evalúa con un valor de 1 el motor que posee una gran masa y requiere elementos para al implementarse que puede ser mayor a los 550 g, valor de 2 al caso que el motor puede llegar a ser de 400 a 550 g con todos los elementos, valor de 3 al motor que vaya de los 250 g a 400 g con los elementos necesarios, valor de 4 al motor que vaya de los 100 g a los 250 g y un valor de 5 al motor que al implementarse en una estructura para el funcionamiento sea liviano por los pocos elementos de 0 a 100 g.

Tabla 3-13. Matriz de selección del tipo de motor a utilizar.

Motor	Control	Implementación	Costo	Masa
Servomotor de rotación continua	3	3	3	4
Motor a pasos	4	4	3	3

Motor DC	1	1	2	3
-----------------	---	---	---	---

A partir de la Tabla 3-13, se muestra el resultado en forma de porcentaje en la Tabla 3-14. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 20 puntos.

Tabla 3-14. Resultado de la selección del tipo de motor por utilizar.

Motor	Total	Porcentaje
Servomotor de rotación continua	13	65%
Motor a pasos	14	70%
Motor DC	7	35%

De las alternativas de solución para la generación de movimiento mencionadas anteriormente, se muestra en la Tabla 3-14, que la alternativa más factible debido a sus características corresponde a los motores a pasos.

La selección del motor a paso se debe a que el control de su movimiento respecto a las demás alternativas de solución resulta más accesible debido a su funcionamiento de movimiento mediante pasos, donde presenta características de frenado mediante la energización del motor, rotación constante, control del avance, control de la precisión, entre otros.

En el tema de la precisión, el motor a pasos presenta la posibilidad de reducir la cantidad de pasos mediante micro pasos, lo que permite mejorar la precisión en el movimiento a un valor deseado con el inconveniente que el torque se ve ligeramente reducido.

La vibración es un tema de los motores a pasos, por lo que una adecuada calibración de la corriente que pasa por el motor y una selección de micro pasos que permita el movimiento del sistema sin sobre esfuerzo posibilita obtener un movimiento suave y sin recalentamiento.

La implementación de un servomotor y un motor DC requieren de algún tipo de freno que garantice que el movimiento se detenga en una posición deseada, además de la necesidad de encoders para controlar su movimiento y control a lazo cerrado para obtener precisión en sus desplazamientos, lo que genere que el motor a pasos obtuviera un mejor puntaje.

A pesar de que la selección del servomotor y el motor DC a utilizar ocasionaría que el motor tenga una masa menor a un motor a pasos, los elementos necesarios por implementar en el sistema provocarían un mayor valor de masa total y volumen en la estructura del sistema.

3.2.4.2 Tarjeta de desarrollo

Un elemento de importancia corresponde a la tarjeta de control que administrará la comunicación computadora-máquina de grabado y se encarga de ejecutar las instrucciones obtenidas por la interpretación del código G.

Las placas de desarrollo para el control del sistema propuestas como alternativa de solución son las que se mencionan a continuación:

- Arduino Uno con CNC Shield
- Arduino Mega con Ramps
- GRBL 3-axis control board 1.1 MYSWEETY
- Tarjeta compatible con MACH3 – RATTMMOTOR

Las diferentes ventajas y desventajas que presentan cada una de las alternativas de solución propuestas para la tarjeta de desarrollo se encuentra en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15. Comparación de ventajas y desventajas de las propuestas de solución para la tarjeta de desarrollo

Placa de desarrollo	Ventajas	Desventajas
Arduino Uno con CNC Shield	<ul style="list-style-type: none"> • El más comúnmente utilizado. • Costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Salidas auxiliares limitadas. • Poca memoria.

	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación. • Compatibilidad. • Código libre. • Compacto 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene sujeción atornillada en la conexión de los cables.
Arduino Mega con Ramps	<ul style="list-style-type: none"> • Costo. • Implementación. • Compatibilidad. • Código libre. • Capacidad para entradas Auxiliares. • Capacidad hasta 5 motores con la shield Ramps y más de forma auxiliar. • Versátil. 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene sujeción atornillada en la conexión de los cables.
GRBL 3-axis control board 1.1 MYSWEETY	<ul style="list-style-type: none"> • Posee ventilación forzada. • Compacto. • Luz indicadora de fallo. • Código libre GRBL. 	<ul style="list-style-type: none"> • No disponible en Costa Rica, requiere importación. • Costo. • Poca memoria, basado en Arduino nano.
Tarjeta compatible con MACH3 - RATTMMOTOR	<ul style="list-style-type: none"> • Compacto. • Anti-interferencias. • Software especializado MACH3. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programación limitada, no es de software libre. • Requiere una licencia. • No disponible en Costa Rica, requiere importación. • Costo. • Número de entradas y salidas.

- En la Tabla 3-16, se muestra la matriz de selección empleada para las alternativas de solución según las métricas que se mencionan a continuación, estas se encuentran evaluadas en el rango de 1 a 5, siendo 1 una condición que no es favorable para el proyecto, 3 una condición con un beneficio intermedio para el proyecto y 5 una condición adecuada o muy beneficiosa para el proyecto. Cada una de las métricas para seleccionar la opción más viable son las siguientes:
- Oportunidad de ampliación: Se consideró la oportunidad de conectar otros elementos mediante puertos auxiliares, sin necesidad de recurrir a otro elemento externo para realizar el manejo. Siendo un valor igual a 1 el caso en el que el elemento no tenga disponible puertos o pines auxiliares libres, un valor de 2 para el caso que no tenga pines para ampliación pero exista un elemento externo que haga posible extender la cantidad, un valor de 3 que la placa esta ajustada en la cantidad de pines auxiliares es decir son exactos para los necesarios, un valor de 4 en el caso que los pines auxiliares son suficientes pero deja disponible un máximo de 3 para expansiones, en el caso de un valor igual a 5 significa que el elemento posee suficientes pines libres para las necesidades del proyecto y dejar libres más de 5 para expansión en el futuro de nuevos elementos.
- Costo: Menor costo del elemento. Se evalúa con un valor de 1 a un costo mayor a los 40 mil colones, un valor de 2 a un costo de 30 mil a 40 mil colones, un valor de 3 a un costo de 20 mil a 30 mil colones, un valor de 4 a un costo de 10 mil a 20 mil colones y con un valor de 5 a un costo entre 0 a 10 mil colones.
- Programación: Oportunidad de ser programada y aceptar código de programas de desarrollo libre. Un valor igual a 1 corresponde que la placa de desarrollo no es capaz de ser modificado el código, 2 al caso que el programa ya se encuentre cargado y modificarlo puede ocasionar problemas, 3 a la que es posible modificarlo con problemas de estabilidad, 4 en el caso que sea posible modificar el que posee únicamente y un valor igual a 5 corresponde

a la placa que posee la oportunidad de poder cambiar o modificar el código del programa para la interpretación del código G.

Tabla 3-16. Matriz de selección del tipo de tarjeta de desarrollo a implementar.

Placa de desarrollo	Oportunidad de ampliación	Costo	Programación
Arduino Uno con CNC Shield	4	3	5
Arduino Mega con Ramps	5	4	5
GRBL 3-axis control board 1.1 MYSWEETY	2	3	2
Tarjeta compatible con MACH3 - RATTMMOTOR	1	2	1

A partir de la *Tabla 3-16*, se muestra el resultado en forma de porcentaje en la *Tabla 3-17*. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 15 puntos.

Tabla 3-17. Resultado de la selección de la tarjeta de desarrollo por utilizar.

Placa de desarrollo	Total	Porcentaje
Arduino Uno con CNC Shield	12	80,0%
Arduino Mega con Ramps	14	93,3%
GRBL 3-axis control board 1.1 MYSWEETY	7	46,6%
Tarjeta compatible con MACH3 - RATTMMOTOR	4	26,7%

En la *Tabla 3-17*, se observa que con una diferencia de 13,3% la solución más factible ante la necesidad de encontrar una tarjeta de desarrollo que sea capaz

de controlar los sistemas para la implementación de la máquina corresponde al Arduino Mega utilizando una shield Ramps.

El puntaje de esta solución se debe a la versatilidad y la oportunidad de crecimiento que posee la Arduino Mega, ya que a las otras alternativas tienen la peculiaridad que entradas y salidas externas libres son mínimas lo que limita la aplicación a ser modificada y colocar nuevos elementos.

En el mercado el Arduino Uno es más barato que el Arduino Mega, la razón del puntaje tan cercano se debe a que en el instante que se deba conectar dos Arduino Uno para lograr obtener mayor capacidad de conectar nuevos elementos y mayor control del sistema aumenta el costo de adquisición, por lo tanto, con una tarjeta Arduino Mega, problemas de ampliación no representa mayor inconveniente ya que tiene entradas o salidas habilitadas como auxiliares o libres para ser utilizadas.

El apartado de programación es de suma importancia ya que se busca que la alternativa de solución sea capaz de utilizar un programa controlador libre para así reducir costos y poder agregar el código para implementar nuevas funciones. En el caso de las 2 últimas opciones de la *Tabla 3-16*. Tienen la característica que “GRBL 3-axis control board 1.1 MYSWEETY” trabaja con GRBL, pero ya instalado y modificarlo puede estar restringido, tal y como pasa con la última opción donde la marca se dedica únicamente a MACH3 sin posibilidad de ser modificado.

3.2.4.3 Láser

El láser corresponde al elemento que permite realizar el grabado mediante la generación de un haz de luz que quema la superficie a trabajar, comúnmente existen 3 tipos de generador de láser para el grabado de material que corresponden a:

- Láser por CO2
- Láser por Fibra
- Láser por Diodo

El láser por fibra y el de CO2 corresponde a elementos diseñados para aplicaciones en donde la máquina va a realizar trabajos donde se requiere potencias altas, como es en el caso de corte de material. Estos tipos de láser para realizar la

implementación requiere de elementos de enfriamiento líquido, radiadores, fuentes de alta potencia y son extremadamente frágiles, por lo que la necesidad de la portabilidad llegaría a perderse además que están sobredimensionados según la necesidad planteada y elevarían el precio de implementación.

Por la razón anterior, la utilización de láser generado por diodo es más factible debido a que son elementos pequeños y de baja potencia, estos poseen enfriamiento natural con una carcasa de aluminio que ayuda a la disipación de calor y un circuito de control que viene integrado como módulo por el fabricante de este tipo de elementos. Son elementos sencillos, robustos y menos costosos en comparación a los dos anteriores

Al seleccionar un láser de tipo diodo, en las especificaciones de diseño se mencionó que se requiere un láser mayor a 3 W esto debido a que a la hora de grabar permite más potencia por lo que podría aumentarse la velocidad de trabajo, además que permite no trabajar a máxima potencia por lo que el diseño de las partes del elemento estaría en menor esfuerzo y por lo tanto se alargaría la vida útil.

En la Tabla 3-18, se muestra la matriz de selección empleada para las alternativas de solución según las métricas que se mencionan a continuación, estas se encuentran evaluadas en el rango de 1 a 5, siendo 1 una condición que no es favorable para el proyecto, 3 una condición con un beneficio intermedio para el proyecto y 5 una condición adecuada o muy beneficiosa para el proyecto. Se comparan mediante métricas para obtener el elemento más confiable y viable.

Las métricas de comparación son las siguientes:

- Costo: el valor monetario del láser. Se evalúa con un valor de 1 un costo mayor de \$175 del elemento, un valor de 2 cuando va de \$130 a \$175, un valor de 3 cuando el valor va de \$130 a \$90, un valor de 4 cuando se encuentra entre \$75 a \$90 y un valor de 5 a un costo mínimo menor o igual a \$75 entre las propuestas.
- Masa: masa del elemento, se espera el elemento con el menor valor de masa. Se califica con un valor de 1 al elemento que tenga una masa mayor

o igual a 400 gramos, un valor de 2 cuando se encuentra entre 300 g a 400 g, un valor de 3 cuando se encuentra entre 200 g a 300 g, un valor de 4 cuando la masa es de 100 g a 200 g y se califica con 5 el elemento que posea una masa menor a 100 gramos.

- Vida útil: la cantidad de horas que está diseñado el láser a máxima potencia. Con el rango de valores de 1 a 5, se evalúa con un valor de 1 al elemento que presente una vida útil menor a 10 000 horas o no presente valor de vida útil, un valor de 2 cuando presente una vida útil de 10 000 horas a 15 000 horas, un valor de 3 cuando presente una vida útil de 15 000 horas a 20 000 horas, un valor de 4 cuando se presente una vida útil de 20 000 horas a 25 000 horas y 5 a la propuesta que en la vida útil tenga mayor a 25 000 horas de servicio.

Tabla 3-18. Matriz de selección del láser a implementar

Láser	Costo	Masa	Vida útil
Oxlasers 450 nm 5 W	3	3	4
Neje laser 5,5 W	4	4	4
Ortuhr 5,5 W	4	4	3
Comgrow 5 W	2	2	2

A partir de la Tabla 3-18, se muestra el resultado en forma de porcentaje en la Tabla 3-19. Este porcentaje es en función del total de puntos que la propuesta solución obtuvo y podría obtener, es decir, con base al total de 15 puntos.

Tabla 3-19. Resultado de la matriz de selección del láser a implementar

Láser	Total	Porcentaje
Oxlasers 450 nm 5 W	10	66,6%
Neje laser 5,5 W	12	80%
Ortuhr 5,5 W	11	73%
Comgrow 5 W	6	40%

En la Tabla 3-19, se muestra el resultado de la matriz de selección, en donde el láser de la marca Neje resulto el más viable para la aplicación. Este láser posee la particularidad de que se encuentra certificado por CE y además la empresa da garantía por 2 años. Presenta ventilación forzada con un pequeño ventilador en la parte superior del elemento y además se encuentra probado para durar más de 20 000 horas de trabajo.

3.2.5 Programa de control por computadora

El programa de control de la máquina corresponde al encargado de interpretar el archivo a grabar, permite definir los parámetros, generar el código G para ser enviado a la tarjeta de desarrollo para su ejecución

Existen gran cantidad de alternativas, entre las alternativas más destacadas se encuentra:

- LightBurn
- Laser_GRBL
- Universal Gcode Sender

En la Tabla 3-20 se muestran las ventajas y desventajas de cada una de las propuestas de solución a partir de la experiencia en el manejo del software.

Tabla 3-20. Ventajas y desventajas de los programas de control

Programa	Ventajas	Desventajas
LightBurn	<ul style="list-style-type: none"> - Dedicado especialmente para trabajos en máquinas que trabajan corte y grabado con láser. - Permite adecuar los parámetros de forma fácil. - Espacio de trabajo para realizar los diseños a grabar y manipularlos - Buena interpretación y generación de vectores. 	<ul style="list-style-type: none"> - Interfaz no intuitiva. - La conexión es automática con el GRBL, pero si el programa se abre sin estar conectado no hay botón de realizar de nuevo el enlace. - De paga \$40 dos licencias. - Modificar los parámetros del GRBL no es tan fácil.
GRBL_Laser	<ul style="list-style-type: none"> - Intuitivo - Interfaz sencilla - Muestra el valor de la coordenada actual en la pantalla. - Fácil modificación de los parámetros de configuración del GRBL. - Botón de conectar y desconectar - Gratuita. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mala interpretación de los vectores - No permite calibrar la potencia y velocidad, lo realiza con aspectos de tratamiento de la imagen, por lo que dificulta obtener buenos resultados
Universal Gcode Sender	<ul style="list-style-type: none"> - Permite muchas configuraciones avanzadas. - Buen manejo de la máquina. - Botón de conectar y desconectar. - Es gratuita. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dedicado al CNC general. - Interfaz no intuitiva. - Puede resultar compleja.

La elección del programa se realizó basado en la experiencia al tratar con los tres programas.

- El universal Gcode sender se encuentra dedicado principalmente para el trabajo de aplicaciones CNC donde los 3 ejes se mueven durante la realización de la tarea, como es el caso de una fresadora CNC por lo que la interfaz y las configuraciones disponibles no son dedicadas para el trabajo con tareas láser, por lo que puede llegar a generar confusión.
- El caso del GRBL Laser es un programa con una interfaz simple donde únicamente se cargan los dibujos y se configuran aspectos de brillo, contraste y blancos, posteriormente se define la velocidad máxima general, por lo que definir o manipular el grabado para obtener otro mejor resultado es complicado.
- El LightBurn a pesar de ser un programa de paga, este se encuentra dedicado a trabajar con láser por lo que la interfaz posee un espacio de trabajo en donde se pueden modificar los proyectos, la configuración de los parámetros se puede realizar por capas y con aspectos de velocidad y potencia, posee características avanzadas pero dedicados al láser, no es tan intuitivo como el GRBL_Laser, pero en poco tiempo se logra entender cómo funciona y lograr crear algo para grabar.

Por lo tanto, se utiliza LightBurn como la mejor opción para el trabajo con la máquina láser desde la computadora.

4 Propuesta de Diseño

En este capítulo se realizará la fase de diseño a detalle con respecto a la alternativa de solución seleccionada en el capítulo anterior en la etapa de selección de concepto, tomando en cuenta los objetivos planteados para el desarrollo del proyecto. La finalidad de este capítulo corresponde al detallar el diseño mediante aspectos técnicos que estuvieron involucrados durante esta fase.

Al igual que en el capítulo de generación y selección de concepto, este capítulo se encuentra dividido en secciones para mostrar el desarrollo de forma ordenada, estas corresponden a las siguientes:

- Diseño mecánico.
- Diseño eléctrico.
- Diseño lógico.

Importante señalar que, debido al láser requerido, la máquina según la norma IEC 60825 la clasificación del láser es de clase 4, por lo que elementos como carcasa protectora, llave de activación, elementos de control manual, entre otros, que se mencionan en la norma son tomados en cuenta en este capítulo.

4.1 Diseño mecánico.

En esta sección se muestran el desarrollo del diseño mecánico de cada uno de los elementos que componen los ejes del sistema. Se analiza el diseño realizado para cada uno de los ejes según las características y los elementos que lo componen; posteriormente se presenta un análisis del diseño y las consideraciones tomadas en la carcasa que encierra al área de trabajo.

4.1.1 Diseño del eje Z

El eje Z como se muestra en la Figura 3-3 del capítulo de metodología, corresponde al eje que realiza un movimiento vertical, con la finalidad de acercar o alejar el láser según la altura que posee el material a trabajar, con el propósito de ajustar la distancia focal para obtener el punto más pequeño del haz de luz para que así el láser funcione de forma óptima.

El eje Z corresponde al eje más corto pero el único que presenta un movimiento vertical, la carrera de este eje es de únicamente 6 cm, permitiendo como resultado final en conjunto con los demás ejes trabajar con piezas con un máximo de 6 cm de altura.

El diseño realizado para el funcionamiento del eje Z es el que se observa a continuación en la Figura 4-1

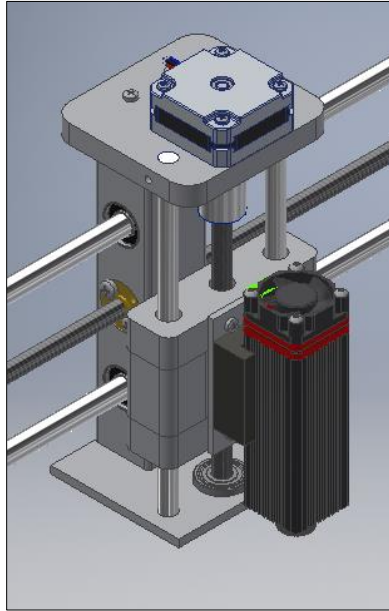


Figura 4-1. Diseño del eje Z. Fuente: Elaboración propia

4.1.1.1 Elemento para la transmisión de potencia

En el capítulo anterior de desarrollo del concepto, se determinó que la opción más viable es la utilización de una varilla roscada para que a partir de la tuerca poder realizar la tarea de transmitir la potencia del motor al elemento elevador del láser. La particularidad del eje Z es que su movimiento debe ser lento ya que debe permitir que el usuario pueda lograr ajustar la distancia de trabajo con respecto a la pieza de forma apropiada y precisa.

Por lo tanto, mediante cálculos se tomó la decisión de utilizar una varilla de acero galvanizado de 8 mm de diámetro nominal, un paso de 1,5 mm y solo un hilo, permitiendo un desplazamiento lento. El cálculo realizado para la comprobación de

esfuerzos debido a que el peso del elemento reposa sobre la varilla son los que se muestran a continuación:

Las características iniciales por parte de la varilla roscada son las siguientes:

$$\text{Diámetro nominal } (d) = 8 \text{ mm}$$

$$\text{Avance } (l) = 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{Paso } (p) = 2 \text{ mm}$$

$$\text{Hilos } (n) = 1$$

$$\text{Diámetro medio } (d_m) = d - \frac{p}{2} = 8 - \frac{1,5}{2} = 7,25 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro menor } (d_r) = d - p = 8 - 1,5 = 6,5 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro medio collarín } (d_c) = d + \frac{p}{2} = 8 + \frac{1,5}{2} = 8,75 \text{ mm}$$

$$\text{Coeficiente de fricción} = 0,09$$

Tabla 4-1. Masa que soporta el eje Z

Pieza	Cantidad	m [Kg]	m total [Kg]
Láser	1	0,20000	0,20000
Slider	1	0,05190	0,05190
Soporte láser	1	0,00300	0,00300
Guía del eje Z	2	0,00640	0,01280
Guía de la barra roscada Z	2	0,01300	0,02600
Rodamientos 8mm	2	0,01353	0,02706
Tuercas	1	0,00459	0,00459
Total			0,32535

En la Tabla 4-1, se muestra las piezas que debe soportar el eje Z, se observa una masa igual a 0,3235 Kg, que tomando en cuenta la aceleración de la gravedad en $9,81 \text{ m/s}^2$, el peso que recae en la varilla roscada es de 3,192 N, por lo que se procedió a calcular el torque necesario para hacer girar el tornillo y lograr elevar la carga, cálculo que se muestra a continuación:

$$T_{Eleva} = \frac{F d_m}{20} \left(\frac{1 + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) + \frac{F f d_c}{20} \quad (4.1)$$

$$T_{Elevar} = \frac{3,192 * 7,25x10^{-3}}{20} \left(\frac{1 + \pi * 0,09 * 7,25x10^{-3}}{\pi * 7,25x10^{-3} - 0,09 * 1,5x10^{-3}} \right) + \frac{3,192 * 0,09 * 8,75x10^{-3}}{20}$$

$$T_{Elevar} = 51,335x10^{-3} Nm$$

Para el caso cuando se desee bajar el carrito girando el tornillo, el torque necesario es el siguiente:

$$T_{Bajar} = \frac{F d_m (\pi f d_m - l)}{20} + \frac{F f d_c}{20} \quad (4.2)$$

$$T_{Bajar} = \frac{3,192 * 7,25x10^{-3}}{20} \left(\frac{\pi * 0,09 * 7,25x10^{-3} - 1,5x10^{-3}}{\pi * 7,25x10^{-3} + 0,09 * 1,5x10^{-3}} \right) + \frac{3,192 * 0,09 * 8,75x10^{-3}}{20}$$

$$T_{Bajar} = 27,771x10^{-6} + 125,685x10^{-6}$$

$$T_{Bajar} = 153,456x10^{-6} Nm$$

Que el primer término durante el cálculo dé como resultado un valor positivo, significa que el tornillo con el collarín presenta una condición autobloqueante, por lo que la carga no va a descender por la acción de su propio peso; para el proyecto esta condición generó la posibilidad de no ser necesario implementar el freno mediante el motor, por lo que garantiza que al desenergizar el motor el eje no se va a liberar y la carga entre en un descenso sin control.

Con los cálculos anteriores se muestra que se necesita menor torque para lograr bajar la carga que para elevarla a partir de la varilla roscada.

Con los torques calculados se realizó el análisis de esfuerzos, iniciando con el esfuerzo cortante debido al momento de torsión al elevar la carga que se genera en el exterior de la varilla.

$$\tau = \frac{16 T_{Elevar}}{\pi d_r^3} \quad (4.3)$$

$$\tau = \frac{16 * 51,335 \times 10^{-3}}{\pi (6,5 \times 10^{-3})^3}$$

$$\tau = 0,9520 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo axial normal:

$$\sigma = -\frac{4 F}{\pi d_r^2} \quad (4.4)$$

$$\sigma = \frac{-4 * 3,192}{\pi (6,5 \times 10^{-3})^2}$$

$$\sigma = -0,096194 \text{ MPa}$$

En el esfuerzo de apoyo σ_B y en el esfuerzo flexionante en la raíz de la rosca σ_b se consideró que cuando se trabaja en esta configuración vertical, la rosca del tornillo que se encuentra en contacto con la rosca de la tuerca, no comparte la carga de forma homogénea en cada una de las roscas presentes, sino que posee un comportamiento donde la primera rosca es la que soporta el mayor esfuerzo con un 38% de la carga, la segunda un 25%, la tercera un 18% y continua hasta que la séptima se encuentra libre de carga [13], por esta razón, en el cálculo del esfuerzo se toma la carga en la primera rosca ya que corresponde al elemento que se encuentra con un esfuerzo crítico.

$$\sigma_B = \frac{-2 (0,38 F)}{\pi d_m p} \quad (4.5)$$

$$\sigma_B = \frac{-2 (0,38 * 3,192)}{\pi * 7,25 \times 10^{-3} * 2 \times 10^{-3}}$$

$$\sigma_B = -0,053255 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = \frac{6 (0,38 F)}{\pi d_r p} \quad (4.6)$$

$$\sigma_b = \frac{6 (0,38 * 3,192)}{\pi * 6,5 \times 10^{-3} * 2 \times 10^{-3}}$$

$$\sigma_b = 0,178199 \text{ MPa}$$

A partir de los esfuerzos previamente calculados, se determina los esfuerzos tridimensionales para posteriormente realizar el cálculo del esfuerzo de Von Mises.

$$\sigma_x = 0,178199 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = -0,096194 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{xy} = 0$$

$$\tau_{yz} = 0,952 \text{ MPa}$$

$$\tau_{zx} = 0$$

Esfuerzo de Von Mises:

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left((\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + 6 * \tau_{yz}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left((0,178199 - 0)^2 + (0 - (-0,096194))^2 + (-0,096194 - 0,178199)^2 + 6 * 0,952^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma' = 1,649 \text{ MPa}$$

A partir del esfuerzo de Von Mises y el valor de resistencia del acero galvanizado igual 230 MPa se determina el valor de factor de seguridad para el elemento, mediante el siguiente calculo.

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (4.8)$$

$$n = \frac{230}{1,649}$$

$$n = 139$$

Con un factor de seguridad igual a 139 se determinó que la elección de una varilla galvanizada de 8 mm para el eje Z funciona de forma adecuada para soportar los esfuerzos al ascender o descender el láser.

4.1.2 Diseño del eje X

El eje X corresponde al eje más largo de los tres ejes que componen al sistema, además es el eje que soporta todo el conjunto diseñado para el eje Z. A diferencia del eje Z, este si debe realizar desplazamientos para lograr que el láser pueda ejecutar el trabajo de grabado, por lo tanto, aspectos como deflexiones y ajustes son importantes para obtener un resultado adecuado.

Este eje como se muestra en la Figura 3-3, corresponde al eje que realiza un movimiento de forma horizontal, que como se mencionó en las especificaciones de

diseño, la longitud mínima deseada de trabajo es de 50 cm definiendo este valor como el apto para el diseño, ya que de aumentarse se obtendrían dimensiones que sobrepasarían las establecidas para el diseño final en conjunto con la carcasa.

El diseño realizado para el eje X corresponde al que se muestra en la Figura 4-2.A). Se muestra únicamente el eje con la varilla roscada como elemento de transmisión de potencia para el movimiento, la colocación del motor y las vigas circulares. En la Figura 4-2)B). Se observa el eje X en conjunto con el eje Z.

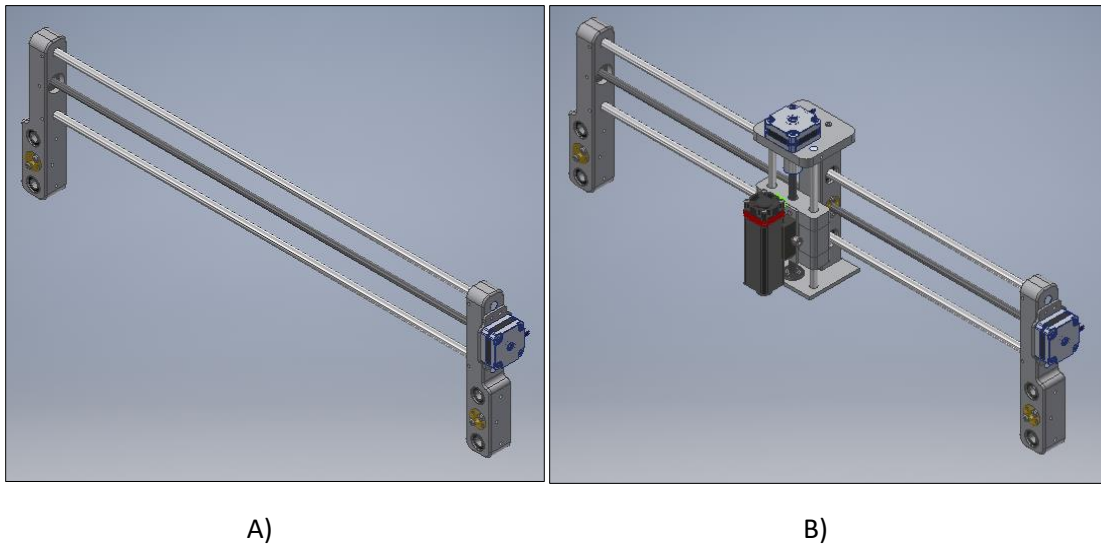


Figura 4-2 A) Diseño del eje X. B) El eje X con el eje Z. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.1 Diseño de las vigas del eje X

El medio guía para el soporte y traslado del carrito diseñado para el eje Z que soporta el láser, se realizó mediante la colocación de vigas circulares en conjunto con rodamientos lineales. En esta sección se realiza un análisis de las vigas para comprobar la deflexión y la selección adecuada del diámetro a utilizar.

Para el caso del eje X la masa que soporta las vigas es el que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4-2. Masa que soporta el eje X

Pieza	Cantidad	m [Kg]	m total [Kg]
Láser	1	0,2	2,000E-01
Slider	1	0,0519	5,190E-02
Soporte láser	1	0,003	3,000E-03
Soporte roles	2	0,0064	1,280E-02
Guía de eje Z	2	0,013	2,600E-02
Rodamientos 8 mm	2	0,01353	2,706E-02
Tuercas	1	0,00459	4,590E-03
Soporte motor Z	1	2,60E-02	2,600E-02
Soporte inferior eje Z	1	1,40E-02	1,400E-02
Guía X	1	5,10E-02	5,100E-02
Motor Z	1	0,2	2,000E-01
Barra roscada Z	1	0,04	4,000E-02
Rodamientos 10 mm X	2	0,02346	4,692E-02
Barra de eje aluminio Z	2	0,021	4,200E-02
Total			7,453E-01

Con una masa de 0,7453 Kg que soporta el eje X y una aceleración de la gravedad igual a $9,81 \text{ m/s}^2$, se obtiene que el eje X soporta 7,3111 N. Como el eje X se compone por dos vigas, el peso se distribuye de forma uniforme por lo que cada una soporta alrededor de 3,655 N.

El primer análisis realizado es por cortante máximo tal y como se muestra en los siguientes cálculos:

La información inicial es la siguiente:

$$F = 3,655 \text{ N}$$

$$L = 585,6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

El valor de la longitud L corresponde al valor obtenido del diseño general a partir del modelo 3D de la estructura de cada uno de los ejes.

El diagrama de cuerpo libre de las vigas se muestra en la siguiente Figura 4-3.

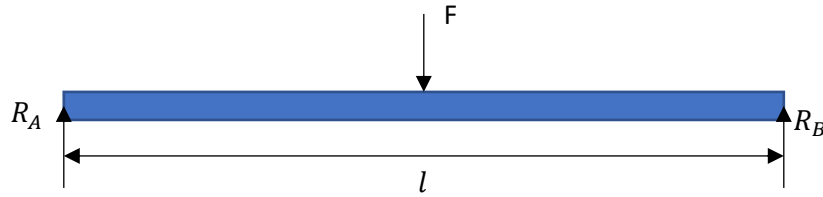


Figura 4-3. Diagrama de cuerpo libre de la viga. Fuente: Elaboración propia

A partir del diagrama de cuerpo libre y el análisis estático se obtienen el valor de las reacciones y los diagramas de fuerza cortante y momento flector Figura 4-4.

Reacciones:

$$R_A = R_B = \frac{F}{2}$$

Diagramas:

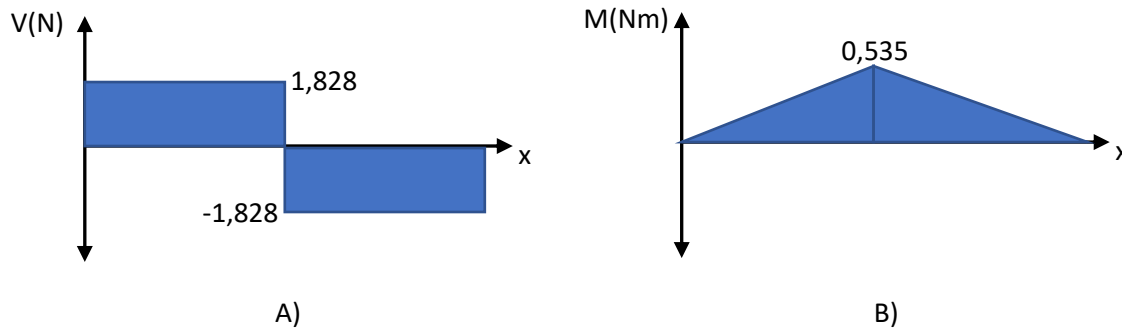


Figura 4-4.A) Diagrama de fuerza cortante transversal para la viga del eje X. B) Diagrama de momento flector para la viga del eje X. Fuente: Elaboración propia

Como el elemento en análisis corresponde a una viga de soporte, esta no presenta la aplicación de torque para la transferencia de movimiento, por lo que a partir de la fórmula del cálculo de cortante máximo se obtiene el valor del radio mínimo permitido, esto se muestra en la siguiente fórmula ya despejada.

$$c = \sqrt[3]{\frac{M_{Max}}{\frac{\pi}{2} \tau_{Max}}} \quad (4,9)$$

Se seleccionó el uso del acero inoxidable 202 ya que presenta características menos dúctiles que el aluminio por temas de deflexión y dureza, además de un

acabado pulido y uniforme que permite un desplazamiento de los rodamientos lineales de forma suave, y por último la buena resistencia al oxido por el cromo que está presente en el acero inoxidable el cual es importante debido al contacto con otros metales como los presentes en el rodamiento.

En el libro [13] se establece que para un acero inoxidable la resistencia al esfuerzo contante es igual a 568 MPa, por lo tanto, con la Ecuación (4.9) el valor del diámetro es el siguiente

$$c = \sqrt[3]{\frac{0,535}{\frac{\pi}{2} 568 \times 10^6}}$$

$$c = 0,843 \text{ mm}$$

$$d = 1,69 \text{ mm}$$

A pesar del diámetro de 1,69 mm obtenido, se seleccionó que la viga sea de 10 mm de diámetro con la consideración de reducir el valor de deflexión como se explica en los cálculos que se muestran más adelante y obtener un comportamiento estable en el láser debido a que la distancia al material de trabajo afecta el resultado. A partir del diámetro seleccionado se obtiene el siguiente factor de seguridad por cortante con la Ecuación (4.10).

$$n = \frac{\text{Diámetro seleccionado}}{\text{Diámetro mínimo}} \quad (4.10)$$

$$n = \frac{10}{1,69}$$

$$n = 5,9$$

El factor de seguridad igual a 5,9 permite asegurar que la viga por esfuerzo cortante difícilmente puede llegar a fallar.

El cálculo de la deflexión en la viga por el peso que debe soportar debido al peso del eje Z se basa en las Ecuación (2.7) y la Ecuación (2.8).

En primer lugar, por el diagrama de cuerpo libre de la Figura 4-3, se realizó un primero corte de sección.

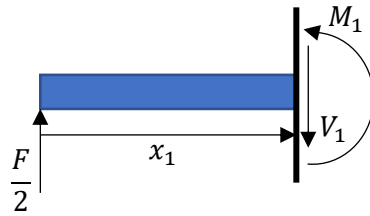


Figura 4-5. Corte de sección 1. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Figura 4-5 se obtiene:

$$M_1 = \frac{F x_1}{2} \quad (4.11)$$

Al aplicar la Ecuación (2.7) y la Ecuación (2.8) con la Ecuación (4.11) se obtuvo que:

$$\theta_1 = \frac{1}{EI} \left(\frac{F x_1^2}{4} + C_1 \right) \quad (4.12)$$

$$V_1 = \frac{1}{EI} \left(\frac{F x_1^3}{12} + C_1 x_1 + C_2 \right) \quad (4.13)$$

Ahora, analizando el segundo corte de sección que se muestra en la Figura 4-6:

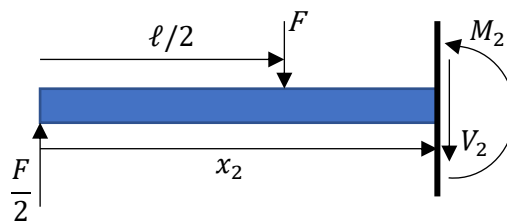


Figura 4-6. Corte de sección 2. Fuente: Elaboración propia

A partir de la Figura 4-6

$$M_2 = \frac{-F x_2}{2} + \frac{F l}{2} \quad (4.14)$$

Al aplicar nuevamente la Ecuación (2.7) y la Ecuación (2.8) con la ecuación (4,14), se llegó al siguiente resultado:

$$\theta_2 = \frac{1}{EI} \left(\frac{-F x_2^2}{4} + \frac{F l x_2}{2} + C_3 \right) \quad (4,15)$$

$$V_2 = \frac{1}{EI} \left(\frac{-F x_2^3}{12} + \frac{F l x_2^2}{4} + x_2 C_3 + C_4 \right) \quad (4,16)$$

Con las condiciones frontera que posee la presente configuración de sistema en estudio se llega a los siguientes resultados:

- Condición frontera 1: $V_1 = 0$ en $x_1 = 0$

Con la Ecuación (4,13) y la condición frontera anterior, se obtuvo el siguiente resultado:

$$C_2 = 0 \quad (4,17)$$

- Condición frontera 2: $V_2 = 0$ en $x_2 = l$

A partir de la condición frontera 2 y la Ecuación (4,16) se llegó al siguiente resultado:

$$0 = \frac{-F l^3}{6} + l C_3 + C_4 \quad (4,18)$$

Tomando en cuenta la configuración de la viga, se obtienen las siguientes condiciones de continuidad:

- Condición de continuidad 1: $V_1 \left(\frac{l}{2} \right) = V_2 \left(\frac{l}{2} \right)$

Con la condición de continuidad 1 con las ecuaciones (4,13) y (4,16), se obtuvo:

$$\frac{-F l^3}{24} = -\frac{C_1 l}{2} + \frac{C_3 l}{2} + C_4 \quad (4,19)$$

- Condición de continuidad 2: $\theta_1 \left(\frac{l}{2} \right) = \theta_2 \left(\frac{l}{2} \right)$

Con la condición de continuidad 2 se evalúa la ecuación (4,12) y (4,15) obteniendo el siguiente resultado:

$$\frac{-F l^2}{8} = -C_1 + C_3 \quad (4.20)$$

Con los resultados obtenidos en las ecuaciones (4,17), (4.18), (4.19) y (4.20) se calculó el valor de las constantes con un sistema de ecuaciones, dando el siguiente resultado:

$$C_1 = -\frac{l^2 F}{16}$$

$$C_2 = 0$$

$$C_3 = -\frac{3 l^2 F}{16}$$

$$C_4 = \frac{l^3 F}{48}$$

Por lo tanto, de las ecuaciones (4,13) y (4,16) que permiten el cálculo de la deflexión de la viga, según la sección en que se encuentre el punto a determinar y el resultado del valor de las constantes obtenidas, se llegó al siguiente resultado:

$$V_1(x_1) = \frac{1}{E I} \left(\frac{F x_1^3}{12} - \frac{l^2 F}{16} x_1 \right) \quad (4.21)$$

$$V_2(x_2) = \frac{1}{E I} \left(\frac{-F x_2^3}{12} + \frac{F l x_2^2}{4} - \frac{3 l^2 F}{16} x_2 + \frac{l^3 F}{48} \right) \quad (4.22)$$

Valores importantes tomando en cuenta que el material corresponde a un acero inoxidable:

- Fuerza (F) = 3,655 N
- Módulo de Young (E)= 193 GPa
- Momento de inercia (I) = $\frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi (5x10^{-3})^4}{4} = 4,909x10^{-10} m^4$
- Longitud total (l) = $585,6x10^{-3} m$

A partir de los valores anteriores y la ecuación obtenida en (4.21) evaluando en x_1 la longitud media de la viga, ya que es el punto con mayor deflexión, se obtuvo una deflexión de la viga igual a:

$$V_{1X}(292,8x10^{-3}) = -161,398 \mu m$$

El valor negativo representa que la deflexión es hacia la parte inferior de la viga, tal y como se espera por el efecto del peso, con respecto al valor de la deflexión de $161,398 \mu m$ se toma como adecuado, ya que es un valor pequeño, lo que garantiza que la variación de altura sería prácticamente imperceptible por el láser en la condición cuando se encuentre en la posición más crítica, que corresponde al centro de las vigas.

4.1.2.2 Diseño del eje transmisor de potencia del eje X

El elemento transmisor de potencia corresponde a un eje de acero inoxidable 304, que en [13] se menciona que posee los siguientes valores de resistencia.

Resistencia a la fluencia:

$$S_y = 276 \text{ MPa}$$

Resistencia última:

$$S_{ut} = 568 \text{ MPa}$$

En base a estos valores anteriores, se calculó el factor de seguridad contra la fatiga para el eje transmisor de potencia.

Para la determinación del factor de seguridad, en [13] se establece diferentes criterios para obtener este valor, por lo tanto, se selecciona el criterio de ED-Goodman debido a que presenta un comportamiento conservador, por lo que brinda mayor confiabilidad en el resultado. Este criterio se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi * d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (4.23)$$

De la ecuación del criterio de ED-Goodman, se realizó el cálculo de la resistencia a la fatiga mediante la ecuación de Marin, el cual corresponde a la siguiente:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e' \quad (4.24)$$

Para obtener el cálculo de los factores de Marin, se definieron cada uno de los factores de la siguiente forma:

- Factor de superficie:

Debido a la presencia de un acabado fino en la superficie del elemento con la finalidad de evitar interferencias durante su funcionamiento, se determinó según la Figura 4-7, una superficie maquinada en frío, por lo que los factores son los siguientes:

$$a = 4,51 \text{ MPa}$$

$$b = -0,265$$

Por lo que el factor de superficie es el siguiente:

$$K_a = aS_{ut}^b \quad (4.25)$$

$$K_a = 4,51 * 568^{-0,265}$$

$$K_a = 0,84$$

Figura 4-7. Factores según el acabado superficial

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} , kpsi	S_{ut} , MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: [13]

- Factor de tamaño:

Con un diámetro del eje transmisor de potencia igual a 8 mm, se tiene la siguiente expresión para el cálculo del factor de tamaño:

$$K_b = 1,24 (d)^{-0,107} \quad (4.26)$$

$$K_b = 1,24 (8)^{-0,107}$$

$$K_b = 0,99$$

- Factor de carga:

En el eje, debido a que su principal función es la transmisión de potencia la carga que predomina es la torsionante, por lo tanto, en [13] se establece:

$$K_c = 0,59$$

- Factor de temperatura:

Debido a que la máquina trabajara en condiciones donde la temperatura no se elevara a un grado de consideración, este factor se toma con un valor igual a la unidad.

$$K_d = 1$$

- Factor de confiabilidad:

Para un resultado en donde se espera obtener un resultado certero, se definió un valor igual 99% de confiabilidad, por lo que en [13] se tiene:

$$K_e = 0,814$$

- Factor de efectos varios:

Este factor se consideró igual a 1 debido a que el eje no se va a encontrar en una situación donde las condiciones son extremas que se vea afectada su integridad por agentes externos en el tiempo.

$$K_f = 1$$

- Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Este valor de resistencia se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \quad (4.27)$$

$$S_e' = 0,5 * 568$$

$$S_e' = 284 \text{ MPa}$$

A partir de los factores anteriores y la ecuación de Marin (4.24), se obtuvo el siguiente resultado:

$$S_e = 0,84 * 0,99 * 0,59 * 0,814 * 1 * 284$$

$$S_e = 113,425 \text{ MPa}$$

Basado en que el motor seleccionado para el eje X en la sección 4.2.1 entrega un torque máximo igual a 0,09 Nm, por lo que se establece el valor de la torsión media como se muestra a continuación:

$$T_m = \frac{T_{motor}}{2} \quad (4.28)$$

$$T_m = \frac{0,09}{2}$$

$$T_m = 0,045 \text{ Nm}$$

Se tomó como consideración el supuesto de un estado crítico en donde el momento flexionante presente no recae completamente en las vigas, por esta razón, se define que la fuerza que recae en las vigas ahora se divide 3 elementos dando como resultado el siguiente momento flexionante:

$$F = \frac{7,311}{3} = 2,437 \text{ N}$$

$$M_a = \frac{\frac{2,437}{2} * 586,6x10^{-3}}{2} = 0,3568 \text{ Nm}$$

Con el criterio de ED-Goodman se tiene que el factor de seguridad es el siguiente.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi * (8x10^{-3})^3} \left\{ \frac{1}{113,425x10^6} [4(0,3568)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{568x10^6} [3(0,045)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = 63,947x10^{-3}$$

$$n = 15,6$$

Con un factor de seguridad mayor a 2 se considera adecuado para la aplicación de transmitir potencia para el eje X.

4.1.3 Diseño del eje Y

El eje de la coordenada Y, corresponde al eje que realiza un movimiento transversal tal y como se muestra en la Figura 3-3. Al igual que el eje X, este es parte fundamental de los movimientos que debe realizar el láser durante el grabado por lo que consideraciones de deflexiones y la capacidad de poder realizar ajustes es de importancia para obtener un resultado adecuado.

En las especificaciones de diseño se estableció que el área de trabajo mínimo es de 25 cm, por lo que para obtener mayor área de trabajo se toma en consideración el trabajar con un valor igual a 35 cm, es decir, 10 cm más a la especificación mínima para dar oportunidad de colocar piezas más largas en esta dirección del eje y evitar que sobresalgan de la parte frontal de la carcasa.

En la siguiente Figura 4-8 A) se muestra el eje Y que corresponden a 4 vigas circulares que al igual que el eje X se le realizó un análisis en cortante y deflexión debido a que este eje soporta el peso del eje Z y X, tal y como se muestra en la Figura 4-8 B) y como se mencionó anteriormente, la deflexión modifica la altura del láser a la pieza de trabajo, por lo tanto, debe ser un valor muy pequeño.

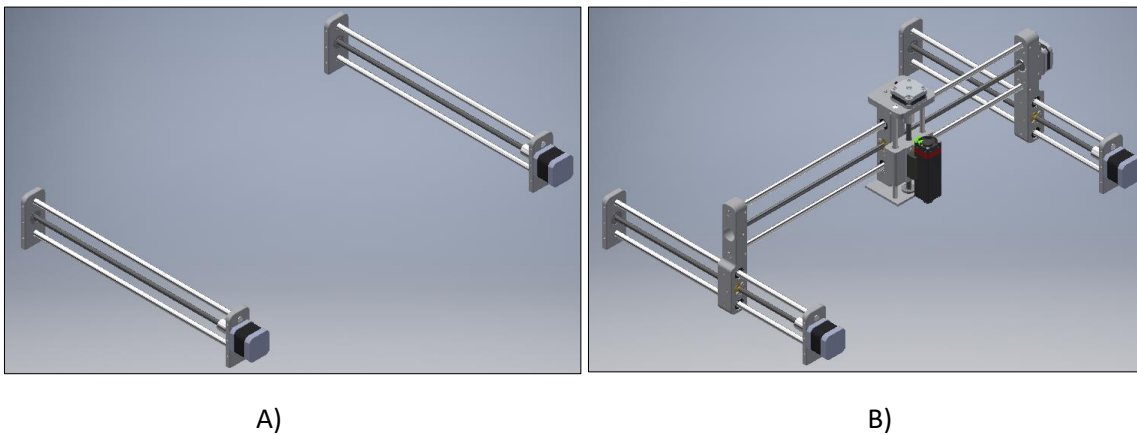


Figura 4-8. A) Diseño del eje Y. B) El eje Y con el eje X y Z. Fuente: Elaboración propia

4.1.3.1 Diseño de las vigas del eje Y

Al igual que el eje X, se utilizó vigas circulares como medio deslizante para el eje Y con la colocación de rodamientos lineales para la reducción de fricción y proporcionar un traslado suave.

Tabla 4-3. Masa que soporta el eje Y

Pieza	Cantidad	m [Kg]	m total
Láser	1	2,000E-01	2,000E-01
Slider	1	5,190E-02	5,190E-02
Soporte láser	1	3,000E-03	3,000E-03
Soporte roles	2	6,400E-03	1,280E-02
Guía de eje Z	2	1,300E-02	2,600E-02
Rodamientos 8 mm	2	1,353E-02	2,706E-02
Tuercas	1	4,590E-03	4,590E-03
Soporte motor Z	1	2,600E-02	2,600E-02
Soporte inferior eje Z	1	1,400E-02	1,400E-02
Guía X	1	5,100E-02	5,100E-02
Motor Z	1	2,000E-01	2,000E-01
Barra roscada Z	1	4,000E-02	4,000E-02
Rodamientos 10 mm X	2	2,346E-02	4,692E-02
Barra de eje aluminio Z	2	2,100E-02	4,200E-02
Barra de eje X	2	3,000E-01	6,000E-01
Barra roscada X	1	1,509E-01	1,509E-01
Motor X	1	2,000E-01	2,000E-01
Soporte de motor X	1	6,000E-03	6,000E-03
Total			1,70214

Anteriormente se señaló, la utilización de 2 vigas por cada lado del eje, siendo un total de 4, por lo que para el análisis de esfuerzo cortante máximo se dividió la carga total en 4 para realizar el estudio a partir de solo una de las vigas.

En base a la Tabla 4-3 la masa que soporta el eje es de 1,7014 Kg, con una aceleración de la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$, se obtiene que en total el peso es de 16,698 N, y tomando en cuenta las 4 vigas en las que esta soportado el sistema, se dividió el peso entre 4 para obtener cuanto le corresponde a cada viga.

$$\frac{16,698}{4} = 4,174 \text{ N}$$

La información inicial para definir el radio mínimo por medio del análisis por cortante máximo es la siguiente, donde F corresponde al peso que soporta una viga y la L es la longitud de la viga obtenida del modelo 3D.

$$F = 4,174 \text{ N}$$

$$L = 408,4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

A partir de la sección anterior del diseño de las vigas del eje X, se tiene que para el caso de las vigas del eje Y presentan el mismo diagrama de cuerpo libre como el que se muestra en la Figura 4-3 por lo tanto, los diagramas de momento flector y fuerza cortante presentan un comportamiento similar, pero con los siguientes valores.

Diagramas:

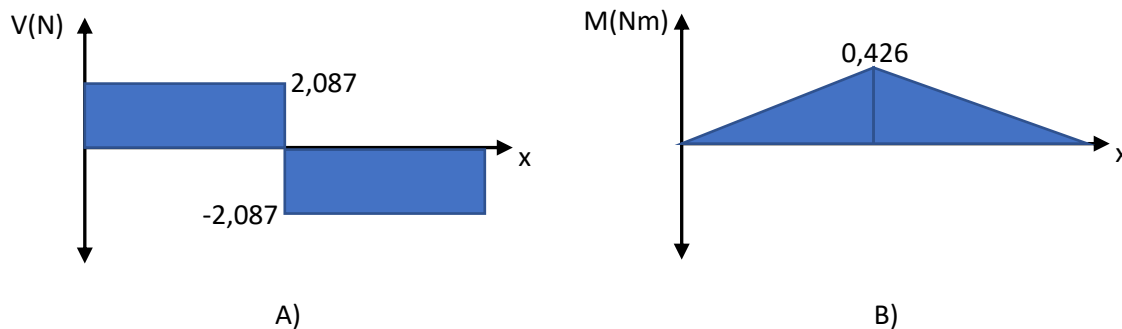


Figura 4-9. A) Diagrama de fuerza cortante transversal para la viga del eje Y. B) Diagrama de momento flector para la viga del eje Y. Fuente: Elaboración propia

Al igual que el eje X, se seleccionó el uso de acero inoxidable 202 por las características de menor ductilidad, el acabado pulido y uniforme y la resistencia al oxido gracias al cromo presente en la composición del acero inoxidable.

Con el valor de cortante máximo que soporta el acero inoxidable y el momento interno que presenta la viga se calculó el radio mínimo necesario a partir de la ecuación de cortante máximo despejada que se muestra en la ecuación (4.9).

$$c = \sqrt[3]{\frac{0,426}{\frac{\pi}{2} 568 \times 10^6}}$$

$$c = 0,782 \text{ mm}$$

$$d = 1,56 \text{ mm}$$

Se seleccionó un diámetro de 10 mm para las vigas; parte de esta decisión es consecuencia del análisis de deflexión, debido a que la distancia del láser con el material de trabajo debe mantenerse con un valor lo más constante posible, por lo que el resultado de deflexión debe ser lo menor posible.

Factor de seguridad por cortante a partir de la ecuación (4.10):

$$n = \frac{10}{1,56}$$

$$n = 6,41$$

Con un factor de seguridad del análisis por esfuerzo cortante igual a 6,41 se considera alto por lo que se tomó el diseño como adecuado.

A continuación, se muestra el cálculo de la deflexión de la viga con el diámetro seleccionado, que toma como referencia el diagrama de cuerpo libre de la sección anterior que se muestra en la Figura 4-3.

Para el cálculo de la deflexión de las vigas en Y se tomó las Ecuaciones (2,7) y (2.8) y el procedimiento realizado en la sección anterior de diseño de las vigas del eje X para la determinación de la deflexión, basado en la configuración en que se encuentra colocada la viga. Este procedimiento obtuvo como resultado la ecuación (4.21).

Los valores importantes para el cálculo son los siguientes:

- Fuerza (F) = 4,174 N
- Módulo de Young (E) = 193 GPa
- Momento de inercia (I) = $\frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi (5 \times 10^{-3})^4}{4} = 4,909 \times 10^{-10} \text{ m}^4$
- Longitud total (l) = $408,4 \times 10^{-3} \text{ m}$

Con los valores anteriores y la ecuación (4,21) evaluada en x_1 igual a la longitud media que presenta la viga en estudio, debido a que corresponde al punto de mayor deflexión, se obtuvo el siguiente resultado:

$$V_{1Y}(204,2x10^{-3}) = -62,520 \mu m$$

El valor negativo en el resultado del cálculo de la deflexión se debe a que representa que la viga se deflacta hacia abajo por el sentido de la acción de la fuerza aplicada, por lo tanto, es un valor esperado. El valor es considerado pequeño y adecuado para la implementación en el sistema.

La suma del resultado de la deflexión obtenida en el eje X y el eje Y, se considera el valor más crítico para el sistema desarrollado ya que es el valor máximo de deflexión, este valor corresponde al siguiente:

$$V_{critico} = V_{1X}(292,8x10^{-3}) + V_{1Y}(204,2x10^{-3})$$

$$V_{critico} = 161,398 \mu m + 62,520 \mu m$$

$$V_{critico} = 223,918 \mu m$$

Tomando en cuenta que el valor de deflexión esperado corresponde a un valor menor a 1 mm y con el valor obtenido se tiene como resultado el siguiente factor de seguridad.

$$n = \frac{V_{teórico}}{V_{critico}}$$

$$n = \frac{1x10^{-3}}{223,918x10^{-6}}$$

$$n = 4,5$$

Con un factor de seguridad mayor o igual a 2 se toma como adecuado el resultado obtenido.

4.1.3.2 Diseño del eje transmisor de potencia del eje Y

El elemento para la transmisión de la potencia para el eje Y presenta las mismas características de material y dimensiones que las mencionadas en la sección 4.1.2.2, por lo que se realiza la siguiente Tabla 4-4 como resumen.

Tabla 4-4. Tabla resumen para el elemento de transmisión de potencia.

Factor	Valor
S_y	276 MPa
S_{ut}	568 MPa
K_a	0,84
K_b	0,99
K_c	0,59
K_d	1
K_e	0,814
K_f	1
S_e'	284 MPa

Basado en que el motor seleccionado para el eje Y en la sección 4.2.1 entrega un torque máximo igual a 0,4 Nm, por lo que se establece que con la ecuación (4.28) la torsión media es la siguiente:

$$T_m = \frac{0,4}{2}$$

$$T_m = 0,2 \text{ Nm}$$

Al igual que en el caso anterior, se tomó como consideración el supuesto de un estado crítico en donde el momento flexionante presente no recae completamente en las vigas, por esta razón se define que la fuerza se divide ahora en 6 elementos, dando como resultado el siguiente momento flexionante:

$$F = \frac{16,698}{6} = 2,783 \text{ N}$$

$$M_a = \frac{\frac{2,783}{2} * 408,4 \times 10^{-3}}{2} = 0,2841 \text{ Nm}$$

Con el criterio de ED-Goodman, se tiene que el factor de seguridad es el siguiente.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi * (8 \times 10^{-3})^3} \left\{ \frac{1}{113,425 \times 10^6} [4(0,2841)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{568 \times 10^6} [3(0,2)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = 55,90 \times 10^{-3}$$

$$n = 17,9$$

Con un factor de seguridad mayor a 2 se considera adecuado para la aplicación de transmitir potencia para el eje Y.

4.1.4 Elemento de ajuste de los ejes

Un aspecto importante a la hora de realizar la máquina es la capacidad de ajustar el espacio muerto que posee las varillas roscadas de transmisión de potencia de los ejes X y Y, a pesar de que estos elementos en especial presenten un ajuste preciso entre la rosca de la varilla y la rosca del collarín en comparación a las varillas que comúnmente se encuentren en el mercado.

Para este aspecto de posibilidad de calibración y evitar el tambaleo de los ejes debido a falta de ajuste por el espacio muerto, se implementó la siguiente solución que se muestra en la Figura 4-10 de igual forma tanto en el eje X y el eje Y.

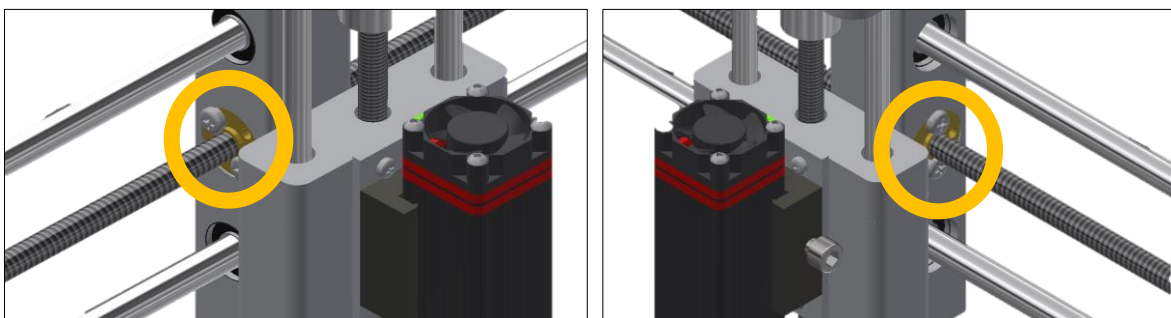


Figura 4-10. Elementos para ajustar y evitar el tambaleo de los ejes X y Y. Fuente: Elaboración propia

Ese elemento debe ajustarse manualmente al punto en el que no exista tambaleo y permita un giro suave del tornillo de transmisión de potencia, ajustando alguno de los lados ya sea comprimiendo o liberando para lograr el ajuste.

4.1.5 Diseño de la carcasa

En la norma IEC 60825 se establece que para las máquinas que involucren un láser de categoría clase 4, que corresponde la categoría que más riesgos posee, se debe de diseñar siempre que sea posible una estructura que permita mantener la trayectoria y el láser encerrado para brindar protección. Por esta razón, se diseñó una carcasa que encierre toda el área de trabajo y permita colocar los elementos eléctricos relacionados al control del sistema.

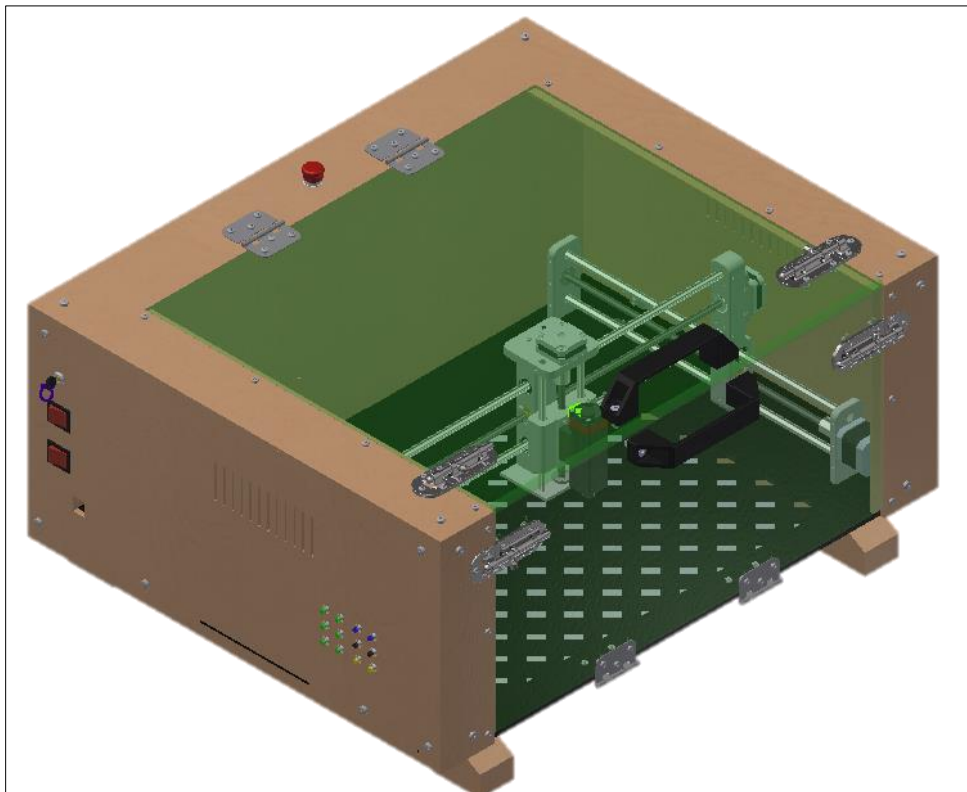


Figura 4-11. Diseño de la carcasa del sistema de grabado láser. Fuente:
Elaboración propia

En la Figura 4-11 se observa la solución final del diseño realizado para la carcasa, donde las consideraciones tomadas para llegar a este resultado se muestran en las siguientes secciones.

4.1.5.1 Protección visual

La carcasa posee paredes de madera por lo que la visualización del haz del láser es imposible de observarlo desde los laterales y la parte posterior, sin

embargo, en la parte frontal se compone de dos tapas como acceso al área de trabajo, además con el fin de supervisar cómo va el proceso, tal y como se muestra en la Figura 4-11.

En la norma UNE-EN 207:2010 sobre las gafas de protección contra radiación láser, establece que para la visualización del proceso es necesario la implementación de gafas o cortinas con filtros para la protección ocular.

El láser seleccionado para la implementación de proyecto posee una longitud de onda igual a 450 nm. En la norma UNE-EN 207:2010 se establece que para este valor de longitud de onda se deben utilizar alguno de los siguientes filtros:

Tabla 4-5. Tipos de filtros.

Material	Color	Saturación	Grosor	Longitud de onda
Acrílico	Anaranjado	50 %	8 mm	315-532
Vidrio	Rojo	16%	5 mm	315-545
Acrílico	Café	22%	5 mm	315-532
Acrílico	Verde	57%	5 mm	315-545

Fuente: [21]

A partir de los filtros mostrados en la Tabla 4-5, se descartaron las opciones del anaranjado por el grosor requerido y el rojo por el material que implica mayor masa. Se seleccionó el acrílico verde al 57% de saturación de color con un grosor de 5 mm, la selección fue basado en la facilidad de adquisición ya que es un color común respecto al café.

4.1.5.2 Elementos eléctricos

En la parte trasera de la carcasa se encuentra un espacio para la colocación de la tarjeta de control, la fuente de poder y el circuito requerido para los botones y la activación por llave. Esta parte trasera se encuentra dividido por una pared que divide el área de trabajo donde se encuentra el láser a la zona donde se encuentran estos elementos eléctricos. Esta se puede observar en la Figura 4-12.

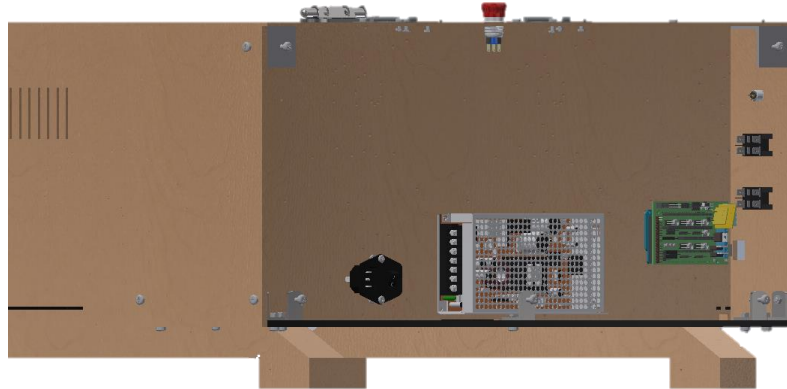


Figura 4-12. Parte trasera para la colocación de los elementos eléctricos de control. Fuente: Elaboración propia.

Los elementos eléctricos presentes para el funcionamiento del láser que van a la estructura de los ejes, se implementó un espacio lateral para el resguardo de los cables y obtener un área de trabajo limpio y ordenado. En la Figura 4-13 se observa en el recuadro la caja rectangular por donde los cables pasan por medio de aberturas hasta la zona trasera hasta la tarjeta de control, esta caja se encuentra ubicada en los dos laterales de la estructura.

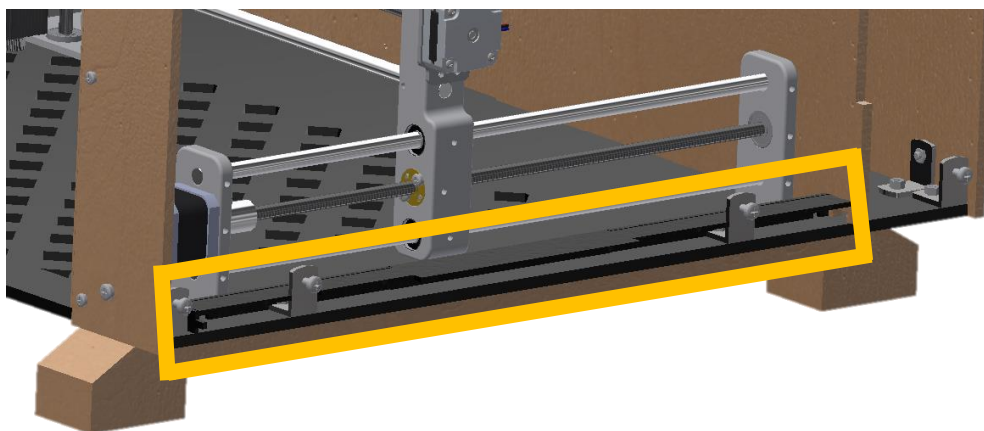


Figura 4-13. Caja rectangular realizado para el manejo de cables. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-14. Se muestra que la botonera para el control de los ejes de forma manual, los apagadores de alimentación de energía para los motores y el láser y el interruptor de llave de seguridad, se encuentran ubicados en el lado izquierdo de la carcasa. La botonera y los interruptores se ubicaron en las esquinas

opuestas para evitar que sean accionados de forma accidental los botones al operar los interruptores y viceversa.



Figura 4-14. Botonera, los interruptores de motores y láser y llave de seguridad.
Fuente: Elaboración propia

El interruptor de paro de emergencia se ubicó en la zona superior de la sección trasera donde se encuentran los elementos de control eléctricos y en el centro de esta área como se muestra en la Figura 4-11. Debido a que debe estar al alcance desde cualquiera de los lados y vistoso para el usuario, ya que en caso de que sea necesario recurrir al interruptor se pueda localizar y alcanzar con facilidad.

4.1.5.3 Área de trabajo

En la Figura 4-15, se muestra que la carcasa dispone de dos puertas independientes para acceder a la parte interna donde se encuentra el área de trabajo, una de ellas se encuentra ubicada en la parte superior y la otra en la parte frontal.

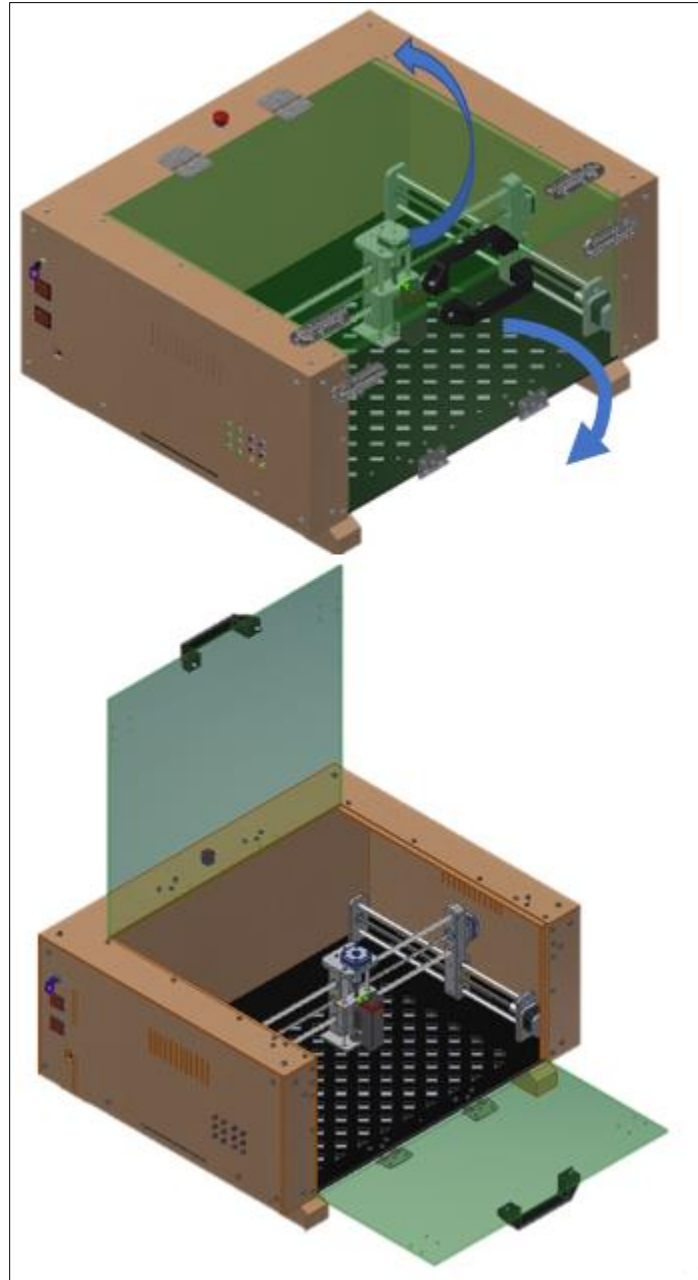


Figura 4-15. Puertas de la carcasa cerrada y abierta. Fuente: Elaboración propia

La puerta superior permite visualizar el funcionamiento, terminar de acomodar o retirar las piezas pequeñas. Para el caso de la puerta frontal además de poder supervisar el proceso, corresponde a la puerta diseñada con la finalidad de que en si el usuario requiere grabar una pieza muy larga o ancha pueda abrirla y deslizar la pieza a trabajar o finalizada desde el frente, esta no posee obstáculos para así poder retirar de forma fácil la pieza una vez trabajada y así evitar alzar la

pieza para reducir el riesgo de que se llegue a golpear algún elemento del sistema de ejes.

En la parte interna de la carcasa se encuentra la parte inferior o “suelo”, que se observa en la Figura 4-16, este corresponde el lugar en donde se apoyan las piezas para ser trabajadas, se diseñó una rejilla con cuadrados de 1 x 1 cm con la siguiente finalidad:

1. Al grabar una pieza esta tiende a calentarse, por lo que la rejilla permite tener la pieza que se está trabajando ventilada.
2. Permitir que el aire fresco tenga como acceder de la carcasa y generar una diferencia de presión para que el humo que se genere salga por las ventilas superiores que se encuentran ubicadas en los laterales de la carcasa, esto considerando que el humo es menos denso que el aire por lo que tiende a subir.

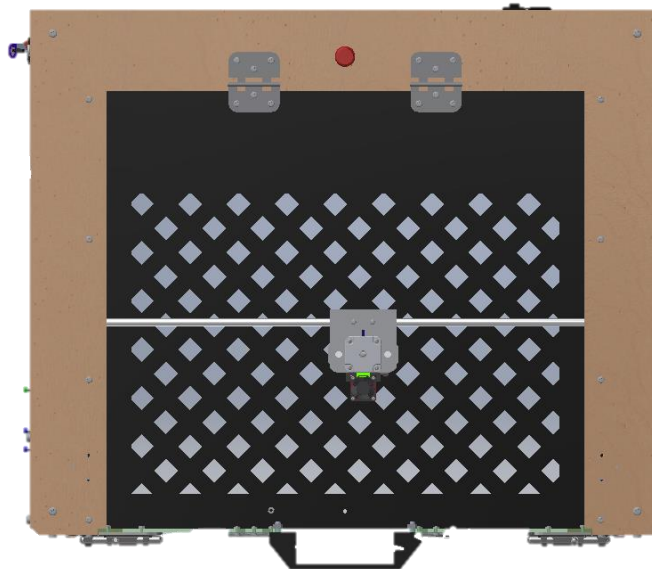


Figura 4-16. Vista superior de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

4.1.5.4 Aspecto estético

La carcasa diseñada es funcional y permite cumplir con la norma IEC 60825, sin embargo, no presenta un diseño extravagante o atractivo, debido a que se buscó el invertir la menor cantidad de material con paredes rectas y así no aumentar la masa total de la máquina.

Un diseño en las paredes laterales mediante láser permite aumentar el atractivo estético y además mostrar el trabajo que se obtiene al trabajar con este tipo de máquinas, además de inspirar orgullo con un diseño que permita visualizar la idiosincrasia del territorio costarricense y características de Turrialba.

En la Figura 4-17 y Figura 4-18, se muestra el diseño realizado para ser grabado en las paredes de la carcasa. Se diseñó para ser grabado mediante láser ya que permite demostrar el tipo de trabajos que se pueden realizar con láser observando las paredes.

Se realizó con capas en escala de grises para diferenciar profundidades y rellenas en caso de que se desee utilizar con pegatina y no grabado. Al ser grabado puede realizarse únicamente el contorno del diseño o ciertas capas únicamente.



Figura 4-17. Primer diseño para las paredes de la carcasa. Fuente: Elaboración propia



Figura 4-18. Segundo diseño para las paredes de la carcasa. Fuente: Elaboración propia

Cada uno de los elementos que componen el diseño realizado tienen un motivo. El motivo de cada elemento se detalla a continuación:

- Fauna: es representada por las vacas, colibrí y mariposas:

El pueblo Turrialbeño se caracteriza por el queso tipo Turrialba por lo que la vaca representa parte del pueblo de Turrialba. Además, Costa Rica es un país con

lugares como Coronado y Zarcero que la producción de leche es característica de la zona.

Al ser un país verde y tropical encontrarse con una mariposa o un colibrí es común en las zonas rurales y además son animales que siempre es un gusto admirarlos por sus colores y apariencia.

- Montañas y Volcán:

Costa Rica es un país lleno de cordilleras por lo que si se encuentra cerca del centro del país siempre es característico el poder observar montañas a lo lejos.

Al encontrarse en el cinturón se fuego, Costa Rica se caracteriza por los volcanes que posee en su territorio, además, en el cantón de Turrialba se encuentra un volcán que es fuente de turismo sostenible a la zona.

- La iglesia:

Sin importar la religión que posee cada persona, sin importar a cuál pueblo se dirija, ya sea grande o pequeño, este siempre se compone por un parque y una iglesia con un aspecto arquitectónico llamativo en el centro de este lugar.

- Las palmeras:

Es un elemento característico de las costas de Costa Rica, por lo que se representa tanto la costa del pacifico como la costa del caribe como partes importantes del país. Además, el pueblo de Turrialba es conocido como “el puerto sin mar” debido al calor y las palmeras que tiene ubicadas cerca del centro del lugar.

- La carreta:

Este es un símbolo nacional que siempre demuestra elegancia y trabajo duro. Recuerda que el costarricense es un país artesano y que los antepasados utilizaron la carreta como instrumento de trabajo para el transporte de mercadería.

En la norma IEC 60825 mencionada en el capítulo 2 del Marco Teórico, se establece que, como parte de la seguridad de la máquina, deben existir advertencias visibles para informar que es un equipo de riesgo. Por lo tanto, se deben colocar las

siguientes etiquetas en el área frontal, la pared del fondo interna, pared externa superior y la pared trasera.



Figura 4-19. Señal de advertencia. Fuente: Norma IEC 60825

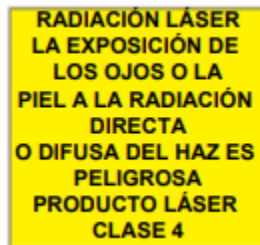


Figura 4-20. Señal explicativa de la utilización láser. Fuente: Norma IEC 60825



Figura 4-21. Señal explicativa para las puertas del láser Fuente: Norma IEC 60825

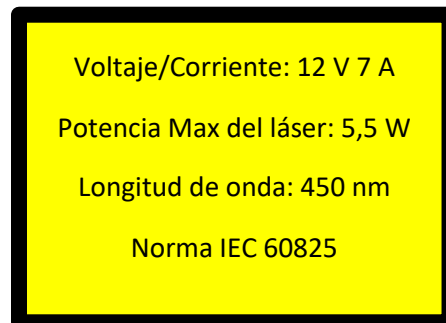


Figura 4-22. Señal informativa. Fuente. Elaboración propia

Para el caso de la Figura 4-19. Debe ser en la parte frontal y superior de la carcasa, la advertencia de la Figura 4-20 debe ser colocada en la pared de la parte inferior interna y externa superior de la carcasa para advertir que es un láser clase 4. El caso de la Figura 4-20, debe colocarse en las paredes acrílicas de la carcasa para indicar que esas corresponden las puertas de ingreso y por ultimo la señal

informativa de la Figura 4-22 se debe colocar en la pared trasera ya que detrás de esta es donde se encuentra los elementos electricos y de control del sistema.

4.2 Diseño eléctrico

En esta sección se detalla la selección y diseño de diferentes elementos del sistema eléctrico. Como primer apartado corresponde a la selección de los motores a pasos que son requeridos para el movimiento de cada uno de los ejes a partir del torque necesario, además, de la distribución de pines en la shield Ramps, como también el circuito general del sistema del sistema de alimentación y un circuito antirrebotes.

4.2.1 Motores

En la Tabla 4-6 que se muestra a continuación, se muestran los valores de momento de inercia y el peso que componen cada uno de los ejes que son parte del sistema, obtenidos a partir del modelo del diseño interno.

Tabla 4-6. Datos importantes para el diseño del motor para cada eje extraídos del modelo.

Eje	$I [Kg m^2]$	Peso [N]
Eje Z	$2,195 \times 10^{-4}$	3,192
Eje X	$5,361 \times 10^{-4}$	7,311
Eje Y	$1,042 \times 10^{-2}$	16,698

4.2.1.1 Eje Z

En la sección del diseño del mecánico en el apartado del diseño del eje Z, se estudió la implementación de una varilla roscada como elemento para elevar y descender la carga, que en este caso correspondía al láser de grabado, durante este cálculo se determinó el torque necesario para poder realizar dichos sentidos de desplazamiento. En este caso, se toma en cuenta el valor obtenido con la ecuación (4.1) que corresponde al torque necesario para elevar la carga, debido a que corresponde al valor más elevado por lo tanto más crítico.

Por lo tanto, el torque necesario es el siguiente:

$$T_{Elevar} = 51,335 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$
$$n = 1,8$$

Con el valor de torque anterior se selecciona un motor que permita entregar más torque para lograr obtener un movimiento suave y sin generar perdida de pasos en el motor a pasos.

El motor OK42STH22-0804AC con un torque de sujeción de 0,09 Nm según la hoja de datos, lo que garantiza un factor de seguridad de 1,8 un valor considerado como aceptable.

4.2.1.2 Eje X

El eje X corresponde al eje más largo del sistema, por lo que las consideraciones tomadas para el cálculo del torque T_a necesario son las siguientes:

Como se mencionó, es el eje más largo del sistema con un valor de 50 centímetros, y tomando en cuenta la potencia del láser es de baja potencia, se define una velocidad lineal de 0,0267 m/s que equivalen a 1600 mm/min, tomando 18,7 segundos realizar el desplazamiento completo, que con la ecuación (2,4) el valor de t_1 es de 4,68 segundos, pero reduciéndolo a 1,2 segundos, el cálculo de N_M se muestra a continuación:

$$N_M = \frac{60 * 0,0267}{2 \times 10^{-3}} = 801 \text{ rev/min}$$

con el valor de inercia de la carga que se muestra en la Tabla 4-6, se calculó el valor del torque que es requerido para el motor T_a a partir de la ecuación (2,4)

$$T_a = \frac{(5,7 \times 10^{-6} + 5,361 \times 10^{-4}) * 801}{9,55 * 1,2} = 0,0376 \text{ Nm}$$

Tabla 4-7. Valores requeridos para el cálculo de TL para el eje X.

Dato	Valor
P_B	2 mm
η	0,85
μ_s	0,09
μ	0,09
g	9,81 m/s^2
θ	0°
F	0,658 N
F_0	0,219 N

Con base en la ecuación (2.6), se realizó el cálculo de la fuerza que va en dirección del movimiento teniendo en cuenta el peso que soporta el sistema, mencionado en la Tabla 4-6.

$$F = 7,311 (\text{sen}(0) + 0,09 \cos(0)) = 0,658 \text{ N}$$

Igual un tercio de la fuerza F se obtiene el valor de la precarga F_0 , por lo que su valor es de:

$$F_0 = \frac{0,658}{3} = 0,219 \text{ N}$$

Por lo tanto, con los datos de la Tabla 4-7 se calcula el valor del torque requerido por la carga, a partir de la ecuación (2.5).

$$T_L = \frac{0,658 * 2x10^{-3}}{2 \pi * 0,85} + \frac{0,09 * 0,219 * 2x10^{-3}}{2 \pi} = 252,683x10^{-6} \text{ Nm}$$

Posteriormente, con los resultados de los torques T_a y T_L se calcula el torque requerido por el motor con la ecuación (2.1)

$$T_M = 0,0376 + 252,683x10^{-6} = 0,0378 \text{ Nm}$$

El motor OK42STH22-0804AC con un torque de sujeción de 0,09 Nm según la hoja de datos, lo que garantiza un factor de seguridad de 2,38, un valor considerado como apropiado para la aplicación.

$$n_z = 1,8$$

$$n_x = 2,38$$

4.2.1.3 Eje Y

El eje Y corresponde al eje que soporta más peso debido a que en él recae el eje X y Z, por esta razón, en este eje se utilizan dos motores para realizar su movimiento y se realiza el cálculo con un motor más grande que el utilizado en el cálculo del motor de los casos anteriores. El motor con el que se realizaron los cálculos posee una inercia de motor igual a $5,7 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$ y un torque de 0,42 Nm.

Al igual que los casos anteriores, es necesario calcular la velocidad de operación con la ecuación (2.3), teniendo en cuenta que el sistema de transmisión de potencia corresponde a una barra roscada con un paso de 2 mm.

Para este eje se define una velocidad lineal de 0,0133 m/s que corresponde a 800 mm/min para recorrer la distancia total del eje, obteniendo un tiempo de 26,3 segundos, por lo que el t_1 según la ecuación (2.4) será igual a 6,6 segundos, pero se seleccionó un valor de 1,1. Por lo que el cálculo de N_M es el siguiente

$$N_M = \frac{60 * 0,0133}{2 \times 10^{-3}} = 399 \text{ rev/min}$$

Seguidamente, con el valor de inercia de la carga que se muestra en la Tabla 4-6 igual a $1,042 \times 10^{-2} \text{ kg m}^2$, se calculó el valor del torque que es requerido para el motor T_a con la ecuación (2.2)

$$T_a = \frac{(5,7 \times 10^{-6} + 1,042 \times 10^{-2}) * 399}{9,55 * 1,1} = 0,3961 \text{ Nm}$$

Tabla 4-8. Valores requeridos para el cálculo de T_L para el eje Y.

Dato	Valor
P_B	2 mm
η	0,85
μ_s	0,09
μ	0,09
g	$9,81 \text{ m/s}^2$

θ	0°
F	1,503 N
F_0	0,501 N

El cálculo de la fuerza en dirección del movimiento está dado por la ecuación (2.6), con el peso que soporta el sistema, mencionado en la Tabla 4-6 que es igual a 16,698 N.

$$F = 16,698 (\text{sen}(0) + 0,09 \cos(0)) = 1,503 \text{ N}$$

Además, se tiene un valor de fuerza de precarga F_0 , igual un tercio de la fuerza F , por lo que su valor es de:

$$F_0 = \frac{1,503}{3} = 0,501 \text{ N}$$

Por lo tanto, con los datos de la Tabla 4-8 se calcula el valor del torque requerido por la carga, a partir de la ecuación (2.5).

$$T_L = \frac{1,503 * 2 \times 10^{-3}}{2 \pi * 0,85} + \frac{0,09 * 0,501 * 2 \times 10^{-3}}{2 \pi} = 577,130 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

Posteriormente, con los resultados de los torques T_a y T_L se calcula el torque requerido por el motor con la ecuación (2.1)

$$T_M = 0,3961 + 577,130 \times 10^{-3} = 0,3967 \text{ Nm}$$

Como se mencionó anteriormente, por la carga en este eje y lo largo del eje X, se requirió la utilización de dos motores para el movimiento, por lo tanto, la carga se reparte en cada uno de ellos, así que el torque que recae en cada motor corresponde a:

$$T_M' = \frac{0,3967}{2} = 0,1983 \text{ Nm}$$

El motor 42HD4027-01-A con un torque de sujeción de 0,4 Nm según la hoja de datos garantiza un factor de seguridad de 2,0, un valor considerado como un valor seguro para la aplicación.

4.2.1.4 Configuración del Driver y la resolución del movimiento

El movimiento mínimo que puede realizar el motor seleccionado para cada uno de los ejes, según sus hojas de datos corresponden a un giro de 1.8° por paso simple.

Para el caso del eje Z donde el tornillo roscado seleccionado posee un avance de 1,5 mm por giro, corresponde a un movimiento de 0,0075 mm por paso del motor. Para los ejes X y Y donde el tornillo posee un avance de 8 mm por giro, este corresponde a un desplazamiento de 0,04 mm por paso que realice el motor.

Para el caso del eje Z resulta apropiado la cantidad de movimiento que realiza el motor por cada paso teniendo en cuenta que el movimiento de este eje es únicamente para ubicar la distancia del láser a la pieza por trabajar, por lo que no se necesita mayor precisión. En el caso del eje X y Y posee una resolución menor a 1 mm como se esperaba en las especificaciones de diseño mencionadas anteriormente, por lo que se puede considerar como adecuado el valor obtenido.

Considerando que la implementación de micro pasos en el motor a pasos tiene ventajas de mejora de precisión, reducción de vibración Por esta razón, se decide implementar una reducción de los pasos por un factor de 1/16 de lo que los motores tienen estipulados como paso simple obteniendo:

- Para el eje Z una precisión de posición de $0,47 \mu\text{m}/\text{paso}$.
- Para el eje X una precisión de posición de $2,5 \mu\text{m}/\text{paso}$.
- Para el eje Y una precisión de posición de $2,5 \mu\text{m}/\text{paso}$.

También, con la expresión (4.29) equivale a:

$$\frac{\# \text{ Pasos}}{\text{milimetro}} = \frac{\text{Pasos por revolucion del motor } [\text{pasos}/\text{rev}]}{\text{avance del tornillo } [\text{mm}/\text{rev}]} * \text{micropaso} \quad (4.29)$$

Para el eje Z:

$$\frac{\# \text{ Pasos}}{\text{milimetro}} = \frac{200}{1,5} * 16 = 2133,33 \text{ pasos}/\text{mm}$$

Para el eje X y Y:

$$\frac{\# \text{ Pasos}}{\text{milimetro}} = \frac{200}{8} * 16 = 400 \text{ pasos}/\text{mm}$$

Los “drivers” utilizados para el control de los motores corresponden a los DRV8825, que físicamente corresponden a los que se muestran en la Figura 2-6.

Cada motor dispone de un “controlador” para el control del movimiento, por lo que cada uno debe ser calibrado para poder entregar la cantidad de corriente que cada motor requiere y evitar sobrecalentamiento y mal funcionamiento por falta de alimentación. En la hoja de datos del DRV8825 se menciona que el valor del potenciómetro de calibración debe entregar un valor de voltaje determinado según la cantidad de corriente que requiere el motor, el cálculo de del voltaje se muestra a continuación.

$$V_{ref} = 5 * R_{medicion} * I_{Alimentación} \quad (4.30)$$

La $R_{medicion}$ que posee los “drivers” es igual a una resistencia SMD de valor R100 que es igual a 0,1 Ω .

El motor seleccionado para el eje X y Z corresponden a las mismas características por lo que de la hoja de datos se tiene que la corriente de alimentación $I_{Alimentación}$ es igual a 0,8 A, para el caso de los motores del eje Y cada uno entrega 1,5 A. Por lo tanto, con la expresión (4.30) se tiene:

Para el eje X y Z:

$$V_{ref} = 5 * 0,1 * 0,8$$

$$V_{ref} = 0,4 V$$

Para el eje Y:

$$V_{ref} = 5 * 0,1 * 1,5$$

$$V_{ref} = 0,75 V$$

4.2.2 Circuito general y el circuito antirrebotes

En la norma IEC 60825 que se mencionó en el capítulo de Marco Teórico, se establece que un aspecto importante en la seguridad, debido a la clasificación que posee el sistema láser, es la implementación de controles que permitan el ajuste y el manejo sin necesidad que el usuario requiera constante intervención en la zona

en donde se encuentra el láser, por lo que parte de la solución de seguridad es la implementación de una botonera de control de movimiento manual.

Se seleccionó la utilización de botones de tipo pulsadores para la realización de la botonera de control de movimientos, este tipo de botones debido a su sistema electromecánico, al ser pulsados presenta una señal de ruido debido a “rebotes” mecánicos, un comportamiento imperceptible para el ser humano, pero a nivel de señales eléctricas ocasiona falsos positivos en la señal, por lo tanto, la implementación de un filtro que elimine este tipo de ruido en la señal es necesario.

Al activar un botón pulsador las variaciones que se generan debido a los rebotes son de muy alta frecuencia, por lo que el circuito a implementar corresponde un filtro de tipo pasa bajas para lograr suprimir las altas frecuencias, además, para evitar falsos positivos debido a interferencias externas se configura con una resistencia *pull up* y así ayudar a suprimir falsos positivos.

El filtro pasa bajas realizado se compone de una resistencia y un capacitor en serie con el pulsador, por lo que se basa de un circuito RC. El circuito debe permitir una descarga rápida que permita una detección correcta al realizar la pulsación suprimiendo todas las altas frecuencias, por esta razón se selecciona un valor de capacitor pequeño de 10 μF y a partir de un valor de diseño de respuesta de 1 ms se calcula el valor de resistencia requerido.

En un circuito RC la constante tau de tiempo viene dada por:

$$\tau = R * C$$

Así que el valor de resistencia con los valores mencionados anteriormente corresponde al siguiente:

$$R = \frac{\tau}{C} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ s}}{10 \times 10^{-6} \text{ F}} = 100 \Omega$$

Por lo tanto, el circuito a implementar con una resistencia de 10 K Ω para ser parte de una configuración de salida para el microcontrolador en estado de *pull up*, se tiene el siguiente circuito que se muestra en la Figura 4-23.

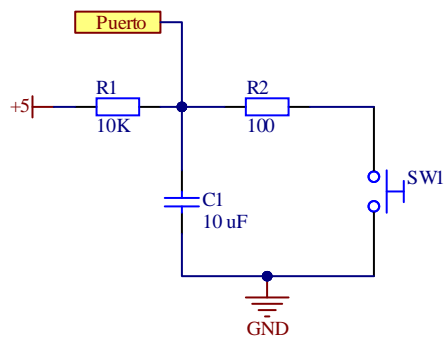


Figura 4-23. Circuito antirrebotes para los botones tipo pulsadores. Fuente:
Elaboración propia

El circuito de la Figura 4-23, se implementó en cada uno de los 12 botones pulsadores que componen la botonera.

Por otra parte, para el control del paso de la alimentación de la fuente de poder y el control del paso de la alimentación de cada uno de los elementos que componen el sistema, se implementó el siguiente circuito que se muestra en la Figura 4-24

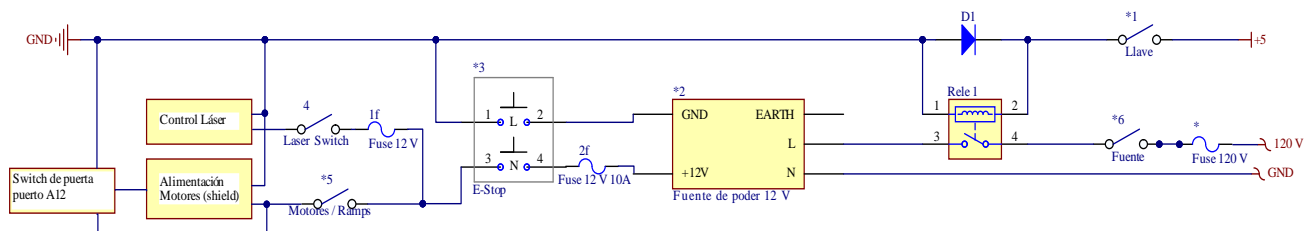


Figura 4-24. Circuito de control de la alimentación de los sistemas. Fuente:
Elaboración propia

La norma IEC 60825, menciona que parte de los elementos de seguridad de la máquina láser es la implementación de un sistema de activación de seguridad, ya sea por llave, tarjeta de acceso contraseña o algún otro que permita que solo el personal autorizado pueda encender el sistema. Para este caso se implementó un interruptor con llave como el que se muestra en la Figura 4-25, que debido a limitaciones de corriente que soporta el interruptor, se implementó un relé que mediante la llave permite la excitación de la bobina y en serie con la activación de

un *Rocker switch* es posible alimentar con 120 V en corriente alterna la fuente de poder de 12 V que alimenta los sistemas.



Figura 4-25. Interruptor con llave utilizado. Fuente: <https://www.microjpm.com/>

Posteriormente a la fuente de poder, se encuentra un botón de emergencia que deshabilita de forma inmediata la alimentación de 12 V del láser y la tarjeta Ramps que se encarga de suministrar la alimentación de los motores a pasos.

El botón de paro de emergencia se debe a que en caso de presentar alguna emergencia el usuario tenga la posibilidad de desconectar la alimentación de 12 V de los sistemas provocando una interrupción directa e inmediata del proceso. La razón de que dicho botón no fue colocado directo en la tarjeta de control, se debe a que en el caso hipotético en que el botón de emergencia se encuentre conectado a la tarjeta de control y ocurra un fallo directamente en la tarjeta de control, esta imposibilite al usuario la desconexión o el paro repentino al presionar el botón.

Como el botón de paro de emergencia su única función es la desenergización de los sistemas cuando el usuario requiera un paro repentino; se colocaron dos *Rocker Switches* para la alimentación de la tarjeta Ramps y el láser de forma independiente, con el fin de otorgar al usuario un mayor control sobre la alimentación de los sistemas, sin necesidad de recurrir al botón de paro de emergencia para la activación o desactivación de los sistemas cuando no exista una emergencia.

La norma IEC 60825 indica que para un láser de clase 4 requiere un dispositivo que reduzca o no permita la emisión del haz del láser a uno de clase 1 o 2 cuando se detecte que la puerta del área de trabajo se encuentre abierta o si durante la operación es abierta, por esta razón en el pin A12 el programa incorpora la posibilidad de agregar un interruptor para realizar esta tarea, por lo que se colocó interruptores tipo finales de carrera para verificar el estado de la puerta de acceso.

4.3 Diseño lógico

En esta sección se detalla el proceso de diseño lógico presente en el proyecto. Como se mencionó anteriormente, el sistema de control se llevó a cabo mediante una tarjeta de desarrollo Arduino Mega con chipset Atmega2560 con el programa controlador GRBL_Mega_5X de código abierto para la interpretación del código G enviados desde una computadora.

Como establece la norma IEC 60825 descrita en el capítulo Marco Teórico, parte de la seguridad que debe tener la máquina, es necesario implementar un sistema de controles que permita al usuario ajustar el sistema láser sin necesidad de que este se vea expuesto. Como solución a este aspecto, se buscó implementar una botonera en la carcasa con el fin de operar los movimientos frente al sistema con una mano y siempre a la vista de los movimientos.

Las funciones implementadas son las siguientes:

- Movimiento positivo y negativo de los ejes X, Y y Z.
- Cambio en la cantidad de avance.
- Colocar un nuevo valor de origen solo en X y Y.
- Colocar un nuevo valor de origen solo en Z.
- Desplazamiento al origen solo en X y Y.
- Desplazamiento al origen solo en Z.
- Desplazamiento al origen en X, Y y Z.

En el Apéndice la Figura A.1, se muestra el diagrama de flujo general del código que fue implementado para la realización de la botonera.

El diagrama de flujo del código que se muestra en la Figura A.1, se describe lo siguiente:

1. En primer lugar, se analiza el estado en el que se encuentra el programa, ya que una vez que se inicia el programa se realiza la pregunta sobre si este se encuentra ejecutando alguna función o el ingreso de algún dato por el puerto serial, en el caso de que sea afirmativo el código continuará con la

interpretación original del código en caso contrario entrará al nuevo código agregado para la botonera.

2. Se analiza si el usuario solicitó un cambio en la cantidad en la distancia con la que avanza el sistema, para posteriormente examinar si pulsó alguno de los botones que realiza el movimiento de alguno de los ejes.

La solución planteada para el movimiento de los ejes se basa en la utilización de la sección del GRBL que interpreta el código G, es decir, dependiendo del botón pulsado, se modifica una línea de código G y se envía a la función del GRBL que procesa el comando en G y ejecuta la instrucción.

La instrucción inicial planteada para el movimiento de los ejes es la siguiente: G91G1X+00.0Y+00.0Z+00.0F1600, que significa lo siguiente:

- G91: se da la instrucción de que se va a trabajar con coordenadas relativas o incrementales, como comúnmente es conocido.
- G1: instrucción para realizar un movimiento lineal.
- X+00.0: Coordenada en el eje X.
- Y+00.0: Coordenada en el eje Y.
- Z+00.0: Coordenada en el eje Z.
- F1600: La velocidad del desplazamiento.

Por lo tanto, el botón presionado modifica el valor de la coordenada según el eje y el avance previamente seleccionado

3. En el caso que el usuario seleccione la opción de colocar un nuevo origen, sea en los ejes X y Y o solo en el eje Z, se realizó la misma lógica que en el punto 2, donde se planteó ejecutar el siguiente comando del código G:

3.1 G92X0Y0: Establece que se va a colocar un nuevo valor de coordenada en el punto que se encuentra, que en este caso la coordenada sería en el origen (0,0) para el eje X y Y respectivamente.

3.2 G92Z0: Instrucción que indica que se va a colocar un nuevo valor de coordenada en el punto que se encuentra la máquina, pero únicamente en el eje Z con un valor de 0.

4. En la opción de realizar el movimiento al punto 0, se ejecuta el comando de código G G90 que corresponde a que el sistema va a trabajar con coordenadas absolutas, por lo que va a tomar el valor de la posición actual y se va a mover hasta que el punto sea el mismo que el de la coordenada dada, por lo tanto:

4.1 El usuario al presionar ir al origen en el eje Z se ejecuta:

- 1- G90G1Z5: Se desplaza con coordenadas absolutas (G90), con movimientos lineales (G1), a la posición del eje Z en $Z = 5$.
- 2- G90G1Z0F25: Posteriormente realiza la misma instrucción, pero con la diferencia de que el eje Z será ahora hasta el valor $Z = 0$ pero con una baja velocidad.

Se realiza en dos comandos de movimiento para evitar desplazamientos bruscos al final del movimiento por la particularidad de que este eje es de forma vertical.

4.2 En el caso que el usuario presione la opción de ir al origen en X y Y se ejecuta:

- 1- G90G1X0Y0: Se desplaza con coordenadas absolutas (G90), con movimientos lineales (G1), hasta la posición en el eje X de $X = 0$ y en el eje Y a $Y = 0$.

4.3 Al presionar la opción de desplazamiento al origen en los tres ejes X, Y y Z, se combinan las instrucciones del punto 4.1 y 4.2 mencionadas anteriormente, en el siguiente orden:

- 1- G90G1Z5
- 2- G90G1Z0F25
- 3- G90G1X0Y0

La razón por la que el movimiento primero se realiza en los ejes Z y posteriormente en el eje X y Y, es tomando en consideración que pueden existir obstáculos para el láser en el eje Z que pueda causar colisión durante el desplazamiento, por lo que se evita desplazándolo hacia su cero, que se encuentra en la parte superior del eje Z.

Para la implementación del código fue necesario modificar ciertas librerías que se mencionaron en el capítulo de Marco Teórico que son parte del programa controlador GRBL para poder realizar las funciones mencionadas en la Figura A.1, las librerías modificadas son las siguientes:

- Main
- Cpu_map
- GRBL
- Protocol

En cada una de estas librerías mencionadas se realiza una descripción de las modificaciones realizadas:

1. GRBL:

Este archivo corresponde al archivo inicial del programa, ya que en el código escrito se encuentra la definición de las librerías estándar que fueron necesarias para la realización del programa como también, de todas las librerías creadas durante la programación.

Al estar trabajando con un Arduino Mega y requerir trabajar con funciones de Arduino, es necesario incluir la biblioteca Arduino, por lo que en la sección donde se incluye las librerías estándar se agregó la librería denominada “Arduino.h”

```
29 // Define standard libraries used by Grbl.
30 #include <avr/io.h>
31 #include <avr/pgmspace.h>
32 #include <avr/interrupt.h>
33 #include <avr/wdt.h>
34 #include <util/delay.h>
35 #include <math.h>
36 #include <inttypes.h>
37 #include <string.h>
38 #include <stdlib.h>
39 #include <stdint.h>
40 #include <stdbool.h>
41 //Libreria requerida para trabajar con Arduino
42 #include <Arduino.h>
```

Figura 4-26. Se incluye la librería Arduino. Fuente: Elaboración propia.

2. Cpu_map:

En librería “Cpu_map” se encuentra definidos los pines de entrada y salida que el sistema requiere, como por ejemplo los pines de comunicación serial, control de motores, finales de carrera y más; pero también se encuentra definido los códigos para adjudicar con los registros los temporizadores para el control del PWM según el pin, ya que se encuentra un pin disponible para el control en caso del láser o una herramienta con motor u otro pin en caso de que se requiera implementar servomotores.

En este caso se encuentra configurado el temporizador “TIMER4B” con una máscara de registro que permite obtener una división de la frecuencia del microcontrolador a un valor de 1.9 KHz en la salida digital denominada como D8, se configura con una división de 1024 (16-bits), para obtener mayor control de la potencia del láser, que con la salida digital y con la tarjeta Shield Ramps corresponde un puerto a 12 V, este pin es de interés para el control del láser.

En la librería “Cpu_map” se detallan los pines a utilizar, por lo tanto, también se definieron los pines necesarios para la realización y ejecución del código por programar. Es importante destacar que por cada función definida en el diagrama de flujo de la Figura A.1 se requirió de un botón, por lo tanto, un pin. La definición de los pines elegidos se muestra la siguiente Figura 4-27.

```
238 //DEFINICION DE PINES A UTILIZAR
239
240 #define POSITIVO_X 16
241 #define NEGATIVO_X 17
242
243 #define POSITIVO_Y 23
244 #define NEGATIVO_Y 25
245
246 #define POSITIVO_Z 27
247 #define NEGATIVO_Z 29
248
249 #define PIN_XY_COLO_ORI 31
250
251 #define PIN_Z_COLO_ORI 33
252
253 #define PIN_XY_IR_ORI 35
254
255 #define PIN_Z_IR_ORI 37
256
257 #define PIN_XYZ_IR_ORI 39
258
259 #define PIN_CANTIDAD_AVANCE 41
```

Figura 4-27. Asignación de los pines por utilizar. Fuente: Elaboración propia

La selección de estos pines se debe a que corresponden a la primera línea de pines auxiliares 4 que posee la Shield Ramps. La línea de pines se puede observar en la Figura 4-28

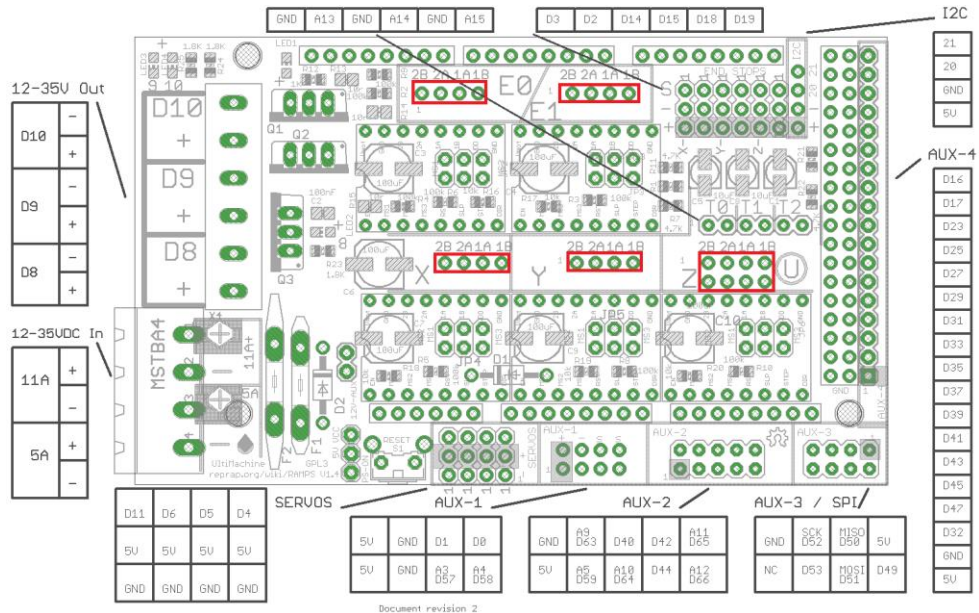


Figura 4-28. Pines de la tarjeta Ramps. Fuente: osoyoo.com

Finalmente, se detalla la designación final de todos los pines que componen al sistema en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9. Designación de los pines

Pin en Ramps	Función
X (2B, 2A, 1A, 1B)	Motor X
Y (2B, 2A, 1A, 1B)	Motor 1 Y
E0 (2B, 2A, 1A, 1B)	Motor 2 Y
Z (2B, 2A, 1A, 1B)	Motor Z
A9	Reiniciar tarjeta de control
A12	Sensor de puerta de seguridad
D3	Sensor X mínimo
D14	Sensor Y mínimo
D18	Sensor Z mínimo
D08	PWM del Láser
D16	Movimiento X+
D17	Movimiento X-
D23	Movimiento Y+
D25	Movimiento Y-
D27	Movimiento Z+

D29	Movimiento Z-
D31	Colocar un nuevo valor de origen solo en X y Y
D33	Colocar un nuevo valor de origen solo en Z
D35	Desplazamiento al origen solo en X y Y
D37	Desplazamiento al origen solo en Z
D39	Desplazamiento al origen en X, Y y Z
D41	Cambiar la cantidad de avance

Fuente: [15]

3. Main:

La librería “main” corresponde a la sección del código donde se encuentra declaradas las variables globales que son utilizadas durante la ejecución. Además, dentro de una función “main” se inicializan y se ejecutan los sistemas iniciales.

Debido a que en esta sección del código se ejecutan y se inicializan los sistemas, se declararon el modo de funcionamiento de cada uno de los pines necesarios por utilizar mediante el comando “pinMode”. La declaración del funcionamiento de los pines se realizó de la siguiente manera:

```

78  int main(void)
79  {
80
81      //PIN MODES AGREGADOS MOVIMIENTO
82      pinMode(POSITIVO_X, INPUT_PULLUP);
83      pinMode(NEGATIVO_X, INPUT_PULLUP);
84
85      pinMode(POSITIVO_Y, INPUT_PULLUP);
86      pinMode(NEGATIVO_Y, INPUT_PULLUP);
87
88      pinMode(POSITIVO_Z, INPUT_PULLUP);
89      pinMode(NEGATIVO_Z, INPUT_PULLUP);
90
91      pinMode(PIN_XY_COLO_ORI, INPUT_PULLUP);
92
93      pinMode(PIN_Z_COLO_ORI, INPUT_PULLUP);
94
95      pinMode(PIN_XY_IR_ORI, INPUT_PULLUP);
96
97      pinMode(PIN_Z_IR_ORI, INPUT_PULLUP);
98
99      pinMode(PIN_XYZ_IR_ORI, INPUT_PULLUP);
100
101      pinMode(PIN_CANTIDAD_AVANCE, INPUT_PULLUP);

```

Figura 4-29. Declaración del modo de funcionamiento de los pines. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-29, se muestra que los pines fueron configurados como entrada “*Input*” y utilizando las resistencias “*Pull up*” del Arduino, esto a pesar del circuito antirrebote implementado para los pulsadores. La razón de esta configuración se debe a falsos positivos ocurridos en las entradas del controlador cuando se utilizaba simplemente como “*input*”, debido a estática en las manos o interferencias cuando se encontraban dispositivos electrónicos como celulares cerca del dispositivo. Para el microcontrolador siempre se está recibiendo 5 V en la entrada por lo que mantiene el sistema saturado y siendo detectado como un 1, esta condición evita que se generen excitaciones externas en la entrada del microcontrolador por este tipo de ruido.

4. Protocol:

La librería denominada “Protocol” se encuentra compuesta por dos archivos, uno con extensión “.c” que involucra la lógica de las funciones y un segundo con extensión “.h” que llama cada una de las funciones realizadas para habilitarlas para su funcionamiento.

Dentro del archivo “Protocol.c” se encuentra la sección del código que se encarga de analizar el estado en que se encuentra la máquina, como la ejecución de estados, alarma o procedimientos en caso de detectar un evento de detener, esperar, cancelar, en reposo, entre otros, que hayan sido enviados al GRBL de forma externa. Además, corresponde el código que espera una vez finalizado una tarea o una vez que los sistemas estén activos y reseteados por las funciones del archivo “main”.

Como una vez establecido los sistemas iniciales el código espera dentro de esta sección del código y es donde inicia el proceso de ejecución de la información enviadas de forma serial, se toma la decisión que corresponde a la mejor opción para colocar el código de programación que se encargara de realizar funciones necesarias para implementar lo mostrado en la Figura A.1.

En primer lugar, se crearon las funciones que leerán los pines y determinaran si algún botón fue presionado y cuál de ellos fue, para que en los casos donde si

fue presionado se cambie el estado de un indicador para posteriormente ser ejecutada la tarea deseada.

Las funciones realizadas son las siguientes:

1. Función de lectura de los pines de movimiento para los ejes X, Y y Z

En la Figura 4-30 se muestra el código implementado para la lectura de los pines que corresponde a los movimientos individuales de los ejes a partir de la botonera. En la figura se muestra como a partir de los nombres adjudicados con anterioridad a los pines para el movimiento en X, Y y Z de forma positiva o negativa, se realizó una lectura a cada uno para comprobar el estado en el que se encuentran, es decir si el usuario presionó el botón.

```
903 //FUNCION DE LECTURA DE MOVIMIENTO DE LOS EJE X Y Z
904 int LEER_BOTONES_EJES(float* x, float* y, float* z)
905 {
906     uint8_t VALOR_PIN =0;
907     int VALOR = 1;
908     //LECTURA DEL BOTON DE MOVIMEINTO EN X POSITIVO
909     VALOR = digitalRead (POSITIVO_X);
910     if(!VALOR){
911         printPgmString(PSTR("\r\n Boton X positivo accionado "));
912         VALOR_PIN++;
913         *x = 1;
914     }
915     //LECTURA DEL BOTON DE MOVIMEINTO EN X NEGATIVO
916     VALOR = digitalRead(NEGATIVO_X);
917     if(!VALOR){
918         printPgmString(PSTR("\r\n Boton X negativo accionado "));
919         VALOR_PIN++;
920         *x = -1;
921     }
922     //LECTURA DEL BOTON DE MOVIMEINTO EN Y POSITIVO
923     VALOR = digitalRead(POSITIVO_Y);
924     if(!VALOR){
925         printPgmString(PSTR("\r\n Boton Y positivo accionado "));
926         VALOR_PIN++;
927         *y = 1;
928     }
929     //LECTURA DEL BOTON DE MOVIMEINTO EN Y NEGATIVO
930     VALOR = digitalRead(NEGATIVO_Y);
931     if(!VALOR){
932         printPgmString(PSTR("\r\n Boton Y negativo accionado "));
933         VALOR_PIN++;
934         *y = -1;
935     }
936     //LECTURA DEL BOTON DE MOVIMEINTO EN Z POSITIVO
937     VALOR = digitalRead(POSITIVO_Z);
938     if(!VALOR){
939         printPgmString(PSTR("\r\n Boton Z positivo accionado "));
940         VALOR_PIN++;
941         *z = 1;
942     }
943     //LECTURA DEL BOTON DE MOVIMEINTO EN Z NEGATIVO
944     VALOR = digitalRead(NEGATIVO_Z);
945     if(!VALOR){
946         printPgmString(PSTR("\r\n Boton Z negativo accionado "));
947         VALOR_PIN++;
948         *z = -1;
949     }
950     return VALOR_PIN;
951 }
```

Figura 4-30. Código de lectura de los pines para el movimiento individual de los ejes. Fuente: Elaboración propia

Se implementó el uso de punteros debido a que permite apuntar el espacio de memoria dinámica y ser consultada la información de cual botón fue presionado de los tres ejes durante el desarrollo del resto del programa, sin necesidad de implementar una lógica distinta que implique en la función aún más líneas de código. Además, por la lógica de funcionamiento descrita en el diagrama de flujo donde se describe que las instrucciones de movimiento son dadas a partir de la generación de código G, es necesario generar el texto del código G con características dinámicas para poder realizar modificaciones según el movimiento deseado a partir de un manejo de los caracteres.

En esta función se creó una variable de tipo “uint8_t” que corresponde a un byte, la función de esta variable es funcionar de indicador de que algún botón fue accionado, por lo tanto, se inicia esta variable denominada “VALOR_PIN” en 0 lógico y en el instante que algún pin es accionado la variable cambia de valor incrementando a un valor de un 1 lógico, este valor es retornado con la función y es el que permite que durante el desarrollo de la lógica principal el programa ingrese a una sub rutina debido a que el indicador se encuentra en positivo lógico y así realizar el análisis del estado de los punteros descritos anteriormente para generar y enviar la instrucción de código G.

Cada uno de los 6 pines para los botones es leído para verificar su estado, cuando es presionado se imprime en la consola serial un texto indicando cual botón fue el accionado y así verificar el debido funcionamiento.

2. Funciones de lectura del pin para colocar un nuevo origen en X, Y y Z

En la siguiente Figura 4-31, se muestra el código implementado para la lectura del pin de colocación de un nuevo origen únicamente en los ejes X y Y, y en la Figura 4-32 se tiene al código para la colocación de un nuevo origen, pero solamente en el eje Z.

La lógica del código de estas funciones es muy similar, se basa en leer el pin en el que el botón se encuentra conectado y en el momento en que se detecte el

cambio de estado, activar un indicador que permita dar a conocer que el botón fue presionado para cada una de las funciones.

En ambas a pesar de que los botones poseen un circuito antirrebote, se implementó una lógica para almacenar el estado cuando son activados y evitar junto al circuito activaciones no deseadas.

```
953 //FUNCION DE LECTURA DEL BOTON PARA LA COLOCACION DE NUEVO ORIGEN EN X Y
954 int LEER_BOTON_COLO_XY()
955 {
956     int VALOR_PIN = 0;
957     int VALOR = 1;
958     int MEM_PRESIONADO = 0;
959     int VALOR_AUXILIAR = 1;
960
961     VALOR = digitalRead(PIN_XY_COLO_ORI);
962
963     while ((VALOR_AUXILIAR = digitalRead(PIN_XY_COLO_ORI)) == 0){
964         MEM_PRESIONADO = 1;
965     }
966
967     if((VALOR == 0) && (MEM_PRESIONADO == 1)) {
968         VALOR_PIN = 1;
969         MEM_PRESIONADO = 0;
970     }
971
972     return VALOR_PIN;
973 }
```

Figura 4-31. Código de lectura del pin para la colocación de un nuevo origen en X y Y. Fuente: Elaboración propia

```
975 //FUNCION DE LECTURA DEL BOTON PARA LA COLOCACION DE NUEVO ORIGEN EN Z
976 int LEER_BOTON_COLO_Z()
977 {
978     int VALOR_PIN = 0;
979     int VALOR = 1;
980     int MEM_PRESIONADO = 0;
981     int VALOR_AUXILIAR = 1;
982
983     VALOR = digitalRead(PIN_Z_COLO_ORI);
984
985     while ((VALOR_AUXILIAR = digitalRead(PIN_Z_COLO_ORI)) == 0){
986         MEM_PRESIONADO = 1;
987     }
988
989     if((VALOR == 0) && (MEM_PRESIONADO == 1)) {
990         VALOR_PIN = 1;
991         MEM_PRESIONADO = 0;
992     }
993
994     return VALOR_PIN;
995 }
```

Figura 4-32. Código de lectura del pin para la colocación de un nuevo origen en Z. Fuente: Elaboración propia

3. Función de lectura de los pines que hacen que se regrese al valor de origen en los ejes X y Y, Z o X, Y y Z

En la Figura 4-33, se muestra el código para la lectura de los pines para realizar la tarea de desplazamiento de los ejes al último punto de origen establecido.

La lógica implementada es de retornar un valor dependiendo de cual pin es el que ha sido accionado, en este caso si se selecciona:

- El botón de ir al origen en X y Y se retorna el valor de 1.
- El botón de ir al origen en Z, se retorna el valor de 2.
- El botón de ir al origen en X, Y y Z se retorna el valor de 3.

A pesar de que los botones poseen un circuito antirrebote, se implementó una lógica para almacenar el estado cuando son activados y evitar junto al circuito activaciones no deseadas, esto para cada uno de los botones mencionados.

```
996 //FUNCION DE LECTURA DE LOS BOTONES PARA REGRESAR AL ORIGEN
997 int LEER_BOTON_IR_ORI()
998 {
999
1000     int VALOR_PIN = 0;
1001     int VALOR = 1;
1002     int VALOR_1 = 1;
1003     int VALOR_2 = 1;
1004     int MEM_PRESIONADO = 0;
1005     int VALOR_AUXILIAR = 1;
1006
1007     //BOTON PARA IR AL ORIGEN EN X Y
1008     VALOR = digitalRead(PIN_XY_IR_ORI);
1009
1010     while ((VALOR_AUXILIAR = digitalRead(PIN_XY_IR_ORI)) == 0){
1011         MEM_PRESIONADO = 1;
1012     }
1013
1014     if((VALOR == 0) && (MEM_PRESIONADO == 1)) {
1015         VALOR_PIN = 1;
1016         MEM_PRESIONADO = 0;
1017     }
1018
1019     //BOTON PARA IR AL ORIGEN EN Z
1020     VALOR = digitalRead(PIN_Z_IR_ORI);
1021
1022     while ((VALOR_AUXILIAR = digitalRead(PIN_Z_IR_ORI)) == 0){
1023         MEM_PRESIONADO = 1;
1024     }
1025
1026     if((VALOR == 0) && (MEM_PRESIONADO == 1)) {
1027         VALOR_PIN = 2;
1028         MEM_PRESIONADO = 0;
1029     }
1030
1031     //BOTON PARA IR AL ORIGEN EN X Y Z
1032     VALOR = digitalRead(PIN_XYZ_IR_ORI);
1033
1034     while ((VALOR_AUXILIAR = digitalRead(PIN_XYZ_IR_ORI)) == 0){
1035         MEM_PRESIONADO = 1;
1036     }
1037
1038     if((VALOR == 0) && (MEM_PRESIONADO == 1)) {
1039         VALOR_PIN = 3;
1040         MEM_PRESIONADO = 0;
1041     }
1042     return VALOR_PIN;
1043 }
```

Figura 4-33. Código de lectura del pin para la colocación de un nuevo origen en Z.
Fuente: Elaboración propia

4. Función para cambiar la cantidad con la que se avanza al presionar el botón de movimiento simple de los ejes

El código de programación de la función de comprobar cuando se presiona el botón de cambiar la cantidad en que se desplaza los ejes al accionar los botones es la que se muestra en la Figura 4-34. En esta figura se muestra como la lógica se basa en cambiar el estado de un indicador retornando un valor de 1 cuando el botón es presionado.

Al igual que las funciones anteriores se implementó “i”, una lógica para almacenar el estado cuando el botón es presionado y evitar junto al circuito activaciones no deseadas.

```
1045 //FUNCION PARA LEER EL BOTON DE CAMBIAR LA CANTIDAD EN QUE SE AVANZA
1046 int LEER_BOTON_CAMBIO_AVANCE() {
1047     int VALOR_PIN = 0;
1048     int VALOR = 1;
1049     int MEM_CAMBIO_AVANCE = 0;
1050     int VALOR_AUXILIAR = 1;
1051
1052     VALOR = digitalRead(PIN_CANTIDAD_AVANCE);
1053
1054     while ((VALOR_AUXILIAR = digitalRead(PIN_CANTIDAD_AVANCE)) == 0) {
1055         MEM_CAMBIO_AVANCE = 1;
1056     }
1057
1058     if((VALOR == 0) && (MEM_CAMBIO_AVANCE == 1)) {
1059         VALOR_PIN = 1;
1060         MEM_CAMBIO_AVANCE = 0;
1061     }
1062
1063     return VALOR_PIN;
1064 }
```

Figura 4-34. Código de lectura del pin para cambiar la distancia del desplazamiento. Fuente: Elaboración propia

A partir de las funciones descritas anteriormente, se creó el código principal para la ejecución de las tareas dependiendo del botón presionado, el código principal se compone de las siguientes partes, basado en el diagrama de flujo de la Figura A.1.

1. Verificación de que el sistema no se encuentra ejecutando un programa.

La instrucción que se muestra en la Figura 4-35, corresponde a la que se encarga de verificar que el sistema no se encuentre ejecutando una instrucción enviada por el puerto serial. En el momento que el sistema se encuentra en el estado de “SERIAL_NO_DATA” que corresponde a que no se está ejecutando alguna tarea, se ingresa a las funciones principales de la botonera implementada.

Durante el envío de datos mediante la comunicación serial el “serial_read()” regresa un valor diferente a “SERIAL_NO_DATA” por lo que se deshabilita el código de la botonera.

```
255 if((c = serial_read()) == SERIAL_NO_DATA){
```

Figura 4-35. Instrucción para verificación de estado. Fuente: Elaboración propia

2. Movimiento simple de los ejes

De forma global para esta librería, se crearon variables para poder controlar el movimiento según cual pin de movimiento simple fue presionado, en la Figura 4-36, se muestran estas variables requeridas.

```
92 //VARIABLES UTILIZADAS
93 float PIN_EJE_X = 0.0;
94 float PIN_EJE_Y = 0.0;
95 float PIN_EJE_Z = 0.0;
96
97 int PIN_SELEC = 0;
98 char* GCODE_EJES = "G91G1X+00.0Y+00.0Z+00.0F1600";
```

Figura 4-36. Variables globales para el movimiento simple de cada eje. Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se muestra la definición de las 3 variables para cada uno de los ejes. Además, la variable denominada “GCODE_EJES” que se encuentra definida como una variable de tipo Char, ya que se le adjudica el texto de la instrucción del código G a modificar dependiendo del eje y la cantidad de desplazamiento seleccionado.

Una vez que se cumple la condición de que no hay información en el puerto serial, se inicia el código con la sección que se encarga de administrar el movimiento de los ejes de forma positiva y negativa según el botón seleccionado. En primer lugar, se requiere inicializar con un valor de 0 las variables requeridas como se muestra en la Figura 4-37.

```
260 PIN_EJE_X = 0.0;  
261 PIN_EJE_Y = 0.0;  
262 PIN_EJE_Z = 0.0;  
263 PIN_SELEC = 0;
```

Figura 4-37. Inicialización de las variables para el movimiento. Fuente: Elaboración propia

Una vez que se encuentran las variables en valores iguales a 0, se procede con la función de lectura de los pines, en el caso que alguno de los botones fuese presionado, la función como se mencionó anteriormente retorna un valor igual a 1 lo que indica que algún botón para el movimiento individual de los ejes fue presionado.

Al tener una respuesta positiva a que el botón fue presionado inicia el proceso de adecuar la línea de código según el botón presionado, en la Figura 4-38 se muestra que a partir de la línea 275 inicia el proceso de cambio según el signo que se presionó, si la función de lectura de los botones indica un número menor a cero esto significa que el botón presionado fue en sentido negativo, en el caso de que sea mayor a 0 corresponde a un valor positivo. Con la variable “GCODE_EJES” que posee la instrucción base y según la variable presionada ya sea en X, Y o Z, se modifica el símbolo de suma o de resta de la instrucción del código G, mediante el número en donde se encuentra ubicado el signo dentro de la instrucción, es decir, en la instrucción según sea para el eje X, Y y Z se modifica el carácter 6, 12 y 18 respectivamente según el sentido de movimiento.

```

267 PIN_SELEC = LEER_BOTONES_EJES(PIN_EJE_X, PIN_EJE_Y, PIN_EJE_Z);
268
269
270
271 if(PIN_SELEC){
272     printPgmString(PSTR("\r\n Eje seleccionado = "));
273     printInteger(PIN_SELEC);
274
275     //CAMBIO DEL SIGNO SEGUN EL EJE SELECCIONADO
276     if(PIN_EJE_X < 0){
277         GCODE_EJES[6] = '-';
278     }else{
279         GCODE_EJES[6] = '+';
280     }
281     if(PIN_EJE_Y < 0){
282         GCODE_EJES[12] = '-';
283     }else{
284         GCODE_EJES[12] = '+';
285     }
286     if(PIN_EJE_Z < 0){
287         GCODE_EJES[18] = '-';
288     }else{
289         GCODE_EJES[18] = '+';
290     }

```

Figura 4-38. Cambio de signo del código G para el movimiento simple del eje.

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se verifica cada pin de los ejes X, Y y Z y se ingresa en la función final de modificación de la instrucción que se encuentra en la variable "GCODE_EJES" en donde se selecciona la cantidad que el eje se va a desplazar, según el avance que se encuentra seleccionado. La modificación se realiza de la misma forma en cómo se cambió el signo del sentido, en la Figura 4-39 se muestra un ejemplo para el caso del eje X, pero para los ejes Y y Z es la misma lógica de funcionamiento, con la diferencia de la ubicación de los caracteres por modificar, en caso del eje X los caracteres a modificar corresponden a los 7, 8 y 10 de la instrucción de código G, para el caso del eje Y corresponden los 13, 14 y 16 y para el eje Z 19, 20 y 22.

```

294 //EJE X
295 if(!PIN_EJE_X){
296     GCODE_EJES[7] = '0';
297     GCODE_EJES[8] = '0';
298     GCODE_EJES[10] = '0';
299
300     printPgmString(PSTR("\r\n Sentido Gcode EJE X= "));
301     printString(GCODE_EJES);
302
303
304 //SELECCION DE LA CANTIDAD DE AVANCE EN X
305 }else{
306     switch(AVANCE){
307     case 0:
308         GCODE_EJES[7] = '0';
309         GCODE_EJES[8] = '0';
310         GCODE_EJES[10] = '1';
311         break;
312     case 1:
313         GCODE_EJES[7] = '0';
314         GCODE_EJES[8] = '1';
315         GCODE_EJES[10] = '0';
316         break;
317     case 2:
318         GCODE_EJES[7] = '1';
319         GCODE_EJES[8] = '0';
320         GCODE_EJES[10] = '0';
321         break;
322     }
323
324     printPgmString(PSTR("\r\n Sentido Gcode Eje X segun el avance = "));
325     printString(GCODE_EJES);
326 }

```

Figura 4-39. Código base para el movimiento del eje de forma simple con la botonera.

Una vez con la instrucción modificada con el movimiento, se ejecuta la instrucción mediante la siguiente línea de código: `report_status_message(gc_execute_line(GCODE_EJES))`.

3. Establecer nuevo origen en los ejes X y Y o únicamente en el eje Z

En la Figura 4-40, se muestra el código para ejecutar la tarea de establecer un nuevo origen. Como primer paso se inicia llamando la función que lee si el botón para definir un nuevo origen en los ejes X y Y o únicamente en el eje Z fue presionado, seguidamente en el caso de que alguna de las funciones sea positiva, el sistema ingresa y ejecuta la línea de código con el comando “`gc_execute_line`” y la instrucción definida de código G para establecer el nuevo origen según el caso seleccionado.

```

401 PIN_SELEC = LEER_BOTON_COLO_XY();
402
403 if(PIN_SELEC){
404     //SE ESTABLECE EL NUEVO ORIGEN EN X Y
405     printPgmString(PSTR("\r\n Ir XY = 0 "));
406     report_status_message(gc_execute_line("G92X0Y0"));
407
408     printPgmString(PSTR("\r\n Colocado XY = 0 "));
409     printInteger(PIN_SELEC);
410 }
411
412 PIN_SELEC = 0;
413 //LECTURA DEL PIN COLOCAR NUEVO ORIGEN EN Z
414 PIN_SELEC = LEER_BOTON_COLO_Z();
415
416 if(PIN_SELEC){
417     //SE ESTABLECE EL NUEVO ORIGEN EN Z
418     printPgmString(PSTR("\r\n Ir Z = 0 "));
419     report_status_message(gc_execute_line("G92Z0"));
420
421     printPgmString(PSTR("\r\n Colocado Z = 0"));
422     printInteger(PIN_SELEC);
423 }

```

Figura 4-40. Código para establecer un nuevo origen tanto en X y Y o en únicamente Z. Fuente: Elaboración propia

4. Cambiar la cantidad de avance

El código de selección de un nuevo cambio de cantidad de avance se muestra en la Figura 4-41 donde al obtener el estado positivo en el indicador de que se detectó un pulso en el botón, se ingresa a una subrutina que se encarga de verificar en cuál de las tres distancias de avance se encuentra actualmente para pasar el indicador de avance a la próxima distancia, esto lo realiza de forma secuencial con cada velocidad.

En esta función se modifica únicamente un indicador de distancia ya que la definición del código G se realiza cuando se presiona los botones de movimiento simple de los ejes.

```

427 PIN_SELEC = LEER_BOTON_CAMBIO_AVANCE();
428
429 if(PIN_SELEC){
430     //SE CAMBIA EL AVANCE
431     printPgmString(PSTR("\r\n Cambio de avance = "));
432     printInteger(PIN_SELEC);
433
434     if(AVANCE >= 2){
435
436         AVANCE = 0;
437         printPgmString(PSTR("\r\n Avance = 0"));
438     }
439     else{
440         AVANCE += 1;
441         printPgmString(PSTR("\r\n Avance = "));
442         print_uint8_base2_ndigit(AVANCE, 8);
443     }
444 }

```

Figura 4-41. Código para establecer una nueva distancia de desplazamiento.

Fuente: Elaboración propia

5. Movimiento al origen en los ejes X y Y, eje Z o los ejes X, Y y Z

Al igual que los procesos anteriores, el código de realizar desplazamientos hacia el origen que se muestra en la Figura 4-42 inicia mediante la función de lectura de los botones, en el instante que la función regrese un valor positivo, se habilita la subrutina donde mediante casos según el valor que retornó la función de lectura de los botones se ejecuta la instrucción de código G. Estas instrucciones están definidas dependiendo de si el usuario desea desplazarse al origen en los ejes X y Y, en el eje Z o los ejes X, Y y Z

```

446 //LECTURA DEL PIN IR AL ORIGEN
447 PIN_SELEC = LEER_BOTON_IR_ORI();
448
449 if(PIN_SELEC){
450     printPgmString(PSTR("\r\n Ir al origen = "));
451     printInteger(PIN_SELEC);
452     switch (PIN_SELEC){
453         //IR AL ORIGEN EN X Y
454         case 1:
455             report_status_message(gc_execute_line("G90G1X0Y0"));
456             printPgmString(PSTR("\r\n Ir al origen XY = "));
457             break;
458         //IR AL ORIGEN EN Z
459         case 2:
460             report_status_message(gc_execute_line("G90G1Z5"));
461             report_status_message(gc_execute_line("G90G1Z0F25"));
462             printPgmString(PSTR("\r\n Ir al origen Z = "));
463             break;
464         //IR AL ORIGEN EN X Y Z
465         case 3:
466             report_status_message(gc_execute_line("G90G1Z5"));
467             report_status_message(gc_execute_line("G90G1X0Y0"));
468             report_status_message(gc_execute_line("G90G1Z0F25"));
469             printPgmString(PSTR("\r\n Ir al origen XYZ = "));
470             break;
471     }
472 }

```

Figura 4-42. Código para realizar la tarea de regresar al origen en los ejes X y Y, únicamente el eje Z y los ejes X, Y y Z. Fuente: Elaboración propia.

5 Resultados y Análisis

En este capítulo se muestran los resultados y el análisis de la comprobación del proceso de diseño llevado a cabo durante la realización del proyecto del sistema láser para realizar grabados. Se muestra simulaciones de comportamiento de elementos mecánicos, comprobación de funcionamiento de la botonera con el código realizado y comprobación mediante prototipo del funcionamiento de los ejes y del proceso de grabado.

5.1 Prototipo

El prototipo realizado se basa en la estructura de los tres ejes, la botonera y todo el junto de elementos seleccionados para el control electromecánico que permite el funcionamiento y obtener el grabado. El objetivo principal del prototipo es una validación del funcionamiento de todo el diseño realizado previamente de forma tangible.

Para la elaboración del prototipo se adquirieron los siguientes elementos:

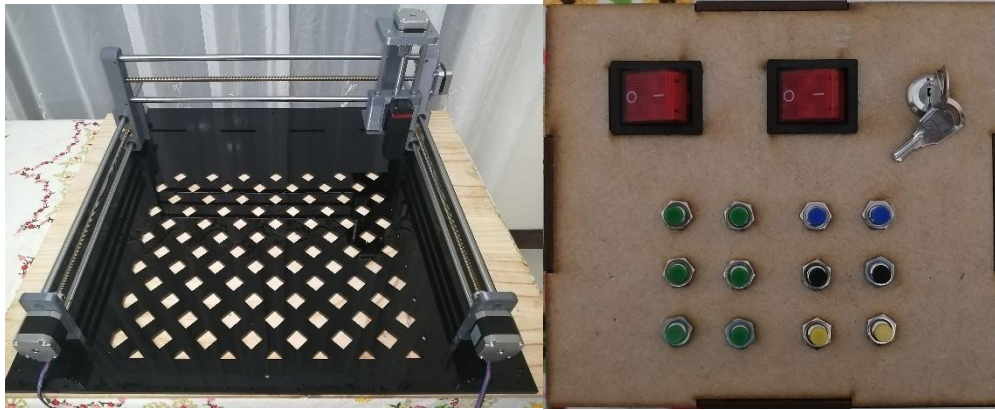
- Arduino Mega
- Shield Ramps
- Driver DRV 8825
- Motores a pasos OK42STH22-0804AC y el 42HD4027-01-A.
- Neje Laser 5,5 W
- Fuente de poder de 12V 10A
- Interruptores
- Pulsadores
- Varillas roscadas T8 y M8x1,5
- Acoples
- Rodamientos lineales
- Viga de acero inoxidable

Para los elementos estructurales, se utilizó una máquina de manufactura aditiva, específicamente una máquina de impresión 3D marca Creality modelo Ender 3 Pro como parte del proceso de creación de cada uno de los elementos.

Debido a limitaciones de espacio para aislar la máquina de impresión 3D fue necesario utilizar un filamento que no emanara gases nocivos para la salud durante el proceso de fundición, por lo que se utilizó filamento PLA color gris para la confección de cada una de las piezas.

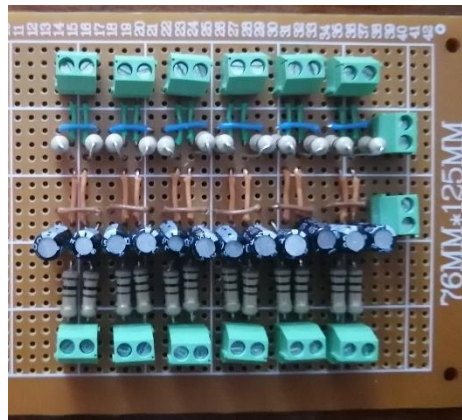
Las piezas realizadas son a escala real a la diseñada y los elementos mencionados anteriormente son parte de los seleccionados dentro de la solución propuesta, por lo que el prototipo se considera muy similar al producto diseñado. En la Figura 5-1.A) se muestra el prototipo realizado con cada uno de los ejes tal y como se mostró en el proceso de diseño.

En el caso de la botonera en la Figura 5-1.B) se muestra el prototipo realizado para la comprobación de funcionamiento del código, el circuito antirrebotes y los botones pulsadores en conjunto. Este corresponde a una caja realizada en MDF con cada uno de los botones necesarios y los switches de control de la alimentación.



A)

B)



C)

Figura 5-1. Prototipo realizado A) Prototipo de estructura de ejes. B) Prototipo de botonera. C) Circuito antirrebotes. Fuente: Elaboración propia

5.1.1 Calibración

El GRBL que corresponde al programa controlador seleccionado posee una sección de configuración en donde elementos del sistema deben ser configurados para obtener un correcto funcionamiento de la máquina.

Para iniciar la sección de configuración, desde el programa “*LightBurn*”, en la sección de consola, se debe ingresar el comando “\$\$” para iniciar una comunicación serial con el microcontrolador y así poder leer o ingresar nuevas configuraciones. En el caso del programa “*GRBL Laser*” se puede ejecutar enviando el comando “\$\$” desde la consola o en la sección de “GRBL” y “Configuración GRBL” acceder en una forma más intuitiva el cambio de parámetros de configuración. En la Figura 5-2

se observa la pantalla en donde se configuro los parámetros del programa controlador desde el programa “GRBL Laser”, debido a la facilidad de ser realizado.

#	Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
\$0	Step pulse time	70	microseconds	Sets time length per step. Minimum 3usec.
\$1	Step idle delay	254	milliseconds	Sets a short hold delay when stopping to ...
\$2	Step pulse invert	0	mask	Inverts the step signal. Set axis bit to ...
\$3	Step direction invert	128	mask	Inverts the direction signal. Set axis bi...
\$4	Invert step enable pin	0	boolean	Inverts the stepper driver enable pin sig...
\$5	Invert limit pins	0	boolean	Inverts the all of the limit input pins.
\$6	Invert probe pin	0	boolean	Inverts the probe input pin signal.
\$10	Status report options	68	mask	Alters data included in status reports.
\$11	Junction deviation	0,000	millimeters	Sets how fast Grbl travels through consec...
\$12	Arc tolerance	0,000	millimeters	Sets the G2 and G3 arc tracing accuracy b...
\$13	Report in inches	0	boolean	Enables inch units when returning any pos...
\$20	Soft limits enable	1	boolean	Enables soft limits checks within machine...
\$21	Hard limits enable	1	boolean	Enables hard limits. Immediately halts mo...
\$22	Homing cycle enable	1	boolean	Enables homing cycle. Requires limit swit...
\$23	Homing direction invert	0	mask	Homing searches for a switch in the posit...
\$24	Homing locate feed rate	100,000	mm/min	Feed rate to slowly engage limit switch t...
\$25	Homing search seek rate	500,000	mm/min	Seek rate to quickly find the limit switc...
\$26	Homing switch debounce delay	250	milliseconds	Sets a short delay between phases of homi...
\$27	Homing switch pull-off distance	5,000	millimeters	Retract distance after triggering switch ...
\$30	Maximum spindle speed	1024	RPM	Maximum spindle speed. Sets PWM to 100% d...
\$31	Minimum spindle speed	5	RPM	Minimum spindle speed. Sets PWM to 0.4% o...
\$32	Laser-mode enable	1	boolean	Enables laser mode. Consecutive G1/2/3 co...
\$100	X-axis travel resolution	402,510	step/mm	X-axis travel resolution in steps per mil...
\$101	Y-axis travel resolution	403,341	step/mm	Y-axis travel resolution in steps per mil...
\$102	Z-axis travel resolution	2222,218	step/mm	Z-axis travel resolution in steps per mil...
\$103		403,341		
\$104		400,000		
\$110	X-axis maximum rate	1600,000	mm/min	X-axis maximum rate. Used as G0 rapid rate.
\$111	Y-axis maximum rate	800,000	mm/min	Y-axis maximum rate. Used as G0 rapid rate.
\$112	Z-axis maximum rate	100,000	mm/min	Z-axis maximum rate. Used as G0 rapid rate.
\$113		800,000		
\$114		100,000		
\$120	X-axis acceleration	2000,000	mm/sec^2	X-axis acceleration. Used for motion plan...
\$121	Y-axis acceleration	2000,000	mm/sec^2	Y-axis acceleration. Used for motion plan...
\$122	Z-axis acceleration	50,000	mm/sec^2	Z-axis acceleration. Used for motion plan...
\$123		2000,000		
\$130	X-axis maximum travel	500,000	millimeters	Maximum X-axis travel distance from homin...
\$131	Y-axis maximum travel	350,000	millimeters	Maximum Y-axis travel distance from homin...
\$132	Z-axis maximum travel	60,000	millimeters	Maximum Z-axis travel distance from homin...
\$133		350,000		

Figura 5-2. Parámetros de configuración del GRBL desde el “GRBL Laser”

Los parámetros modificados son los siguientes:

- “Report in inches” (Reportar en pulgadas) \$13 = 0:

Con un valor igual a cero 0 para indicar que la unidad de medida a utilizar para el desplazamiento es milímetros.

- “*Soft limits enable*” (Habilitar límites flexibles) \$20 = 1:

Habilitado en 1 para encender los límites flexibles y regula que la máquina no exceda los límites de la máquina definidos.

- “*Hard limits enable*” (Habilitar los límites) \$21 = 1

Habilitado en 1 para que si eventualmente se requieren los límites de ejes el programa controlador se encuentra habilitado.

- “*Homing cycle enable*” (Habilitar la rutina de buscar el origen) \$22 = 1

Habilitado para el caso que los límites de eje estén colocados el programa tenga la capacidad de buscarlos.

- “*Maximum spindle speed*” (Velocidad máxima del husillo) \$30 = 1024

El valor corresponde a el valor de bits que el puerto en el que está conectado el láser tiene la capacidad de interpretar.

- “*Minimum spindle speed*” (Velocidad mínima del husillo) \$31 = 0

Corresponde al valor mínimo que el láser requiere para deshabilitarse.

- “*Laser mode*” (Modo Láser) \$32 = 1

Permite que el programa controlador entienda que ahora ejecutara secuencias para láser y no para fresadoras

- “*X-axis travel resolution*” (Eje X resolución del viaje) \$100 = 402,510

La resolución del eje X corresponde a un valor de 402,510 pasos/mm a pesar de que el capítulo anterior se definió que corresponde a un valor de 400 pasos/mm al realizar las mediciones de movimiento al desplazarse 10 cm faltaban milímetros para ajustar el movimiento.

- “*Y-axis travel resolution*” (Eje Y resolución del viaje) \$101 y \$103 = 403,341

La resolución del eje Y corresponde a un valor de 403,341 pasos/mm a pesar de que el capítulo anterior se definió que corresponde a un valor de 400 pasos/mm al realizar las mediciones de movimiento al desplazarse 10 cm faltaban milímetros para ajustar el movimiento. Se configura tanto en 101 como en 103 debido a que este eje posee dos motores y el GRBL requiere configurar cada motor de forma independiente por lo que se coloca el mismo valor en ambos.

- “*Z-axis travel resolution*” (Eje Z resolución del viaje) \$102 = 2222,218

La resolución del eje Z corresponde a un valor de 2222,218 pasos/mm a pesar de que el capítulo anterior se definió que corresponde a un valor de 2133,333 pasos/mm al realizar las mediciones de movimiento al desplazarse 5 cm faltaban milímetros para ajustar el movimiento.

- “*X-axis maximum rate*” (Eje X velocidad máxima) \$110 = 1600

Corresponde a la velocidad máxima en mm/min en que el motor del eje X funciona de forma adecuada.

- “*Y-axis maximum rate*” (Eje Y velocidad máxima) \$111 y \$113 = 800

Corresponde a la velocidad máxima en mm/min en que el motor del eje Y funciona de forma adecuada, se debe configurar en ambos parámetros debido a que cada motor del eje Y se configura de forma independiente, pero con el mismo valor.

- “*Z-axis maximum rate*” (Eje Z velocidad máxima) \$112

Corresponde a la velocidad máxima en mm/min en que el motor del eje Z funciona de forma adecuada.

- “*(X, Y or Z) axis acceleration*” (Eje X, Y o Z aceleración) \$120, \$121, \$122 y \$123 = 2000

Este valor fue el máximo de aceleración en mm/s^2 en el que los motores soportaron de aceleración. En este valor si se aumentaba no había variación en la aceleración y comportamiento de los motores.

- “X-axis maximum travel” (Eje X desplazamiento máximo) \$130 = 500

Ese parámetro permite definir los límites de la máquina para que en combinaciones de los límites flexibles no se excedan las dimensiones de la estructura, para el caso del eje X corresponde a 50 cm.

- “Y-axis maximum travel” (Eje Y desplazamiento máximo) \$131 y \$133 = 350

Ese parámetro permite definir los límites de la máquina para que en combinaciones de los límites flexibles no se excedan las dimensiones de la estructura, para el caso del eje Y corresponde a 35 cm en los dos números de parámetros debido a los dos motores que requirió el eje.

- “Z-axis maximum travel” (Eje Z desplazamiento máximo) \$132 = 60

Ese parámetro permite definir los límites de la máquina para que en combinaciones de los límites flexibles no se excedan las dimensiones de la estructura, para el caso del eje Z corresponde a 6 cm

En el proceso de ajuste de los ejes, se verificó que los ejes no se tambalearan y se ajustó cada uno de los tornillos que se encuentran en los collarines para evitar presencia de imprecisiones.

En el caso del láser se ajustó el lente para que entregara el punto más pequeño posible, ya que en este punto es en que mayor energía posee debido a que corresponde al punto de convergencia del haz de luz.

5.1.2 Pruebas de validación del movimiento

La finalidad del prototipo es de realizar pruebas que permitan verificar el debido funcionamiento del diseño, por lo tanto, se realizó una prueba para determinar el grado de precisión que posee la máquina al indicarle que realice un movimiento de cierta distancia por toda el área de trabajo.

5.1.2.1 Comprobación de precisión

Esta prueba se llevó a cabo realizando puntos por toda el área de trabajo, mediante el desplazamiento que permite el estudio del eje X y mediante otro movimiento donde se estudió el eje Y. Cada estudio corresponde únicamente a cada eje, el movimiento comienza donde termina el movimiento anterior, pero realizando un desplazamiento lateral con el eje que no está en estudio hasta cubrir el área de trabajo completa.

Debido a la naturaleza de la muestra en donde se desconoce la varianza que posee el elemento en estudio, es necesario recurrir al análisis de la distribución t-Student, distribución que presenta una forma como el de la Figura 5-3. En [22] se menciona que cuando se demuestre la normalidad en la muestra y el tamaño de la muestra es pequeña, es decir, con una cantidad de datos muestreados menor a 30, se puede utilizar la distribución t-Student definiendo el intervalo de confianza mayor o igual a 95% para obtener un resultado robusto.

Por esta razón, se determinó que para la prueba se realizaron 24 muestras a lo largo de cada uno de los ejes y así el poder obtener el intervalo mediante la probabilidad t-Student, para posteriormente verificar cuanto porcentaje de la muestra entran en el rango esperado.

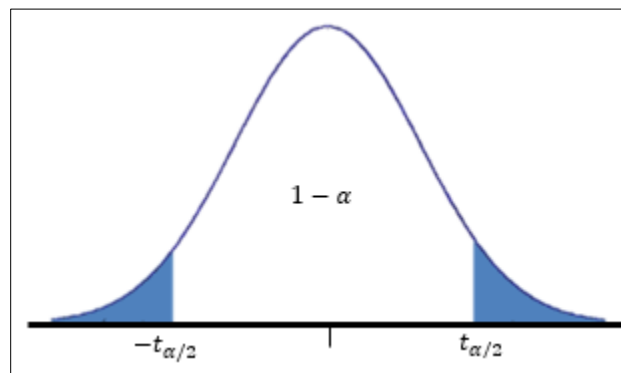


Figura 5-3. Forma de la distribución t-Student. Fuente: [23]

Para una distribución t-student, el rango en donde se ubica la media esperada para el rango de confianza que se determine, se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S_{n-1}}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

$$\alpha = 1 - \text{intervalo de confianza} \quad (5.2)$$

Con los grados de libertad

$$v = n - 1 \quad (5.3)$$

Al realizar las pruebas y las mediciones a partir de un pie de rey Sparkfun de $\pm 0,02$ mm de resolución. Estos valores de la medición se pueden consultar en la Tabla 5-1 para el eje X y la Tabla 5-2 para el eje Y. Para ambos ejes se realizó un desplazamiento de 100 mm y se dividió el eje que no está en estudio en 24 partes.

Tabla 5-1. Resultado de la medición de los desplazamientos de 100 mm del eje X.

Número de medición	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en X ($\pm 0,04$ mm)
1	0-100	0,00	99,93
2	100-200	15,22	100,25
3	200-300	30,43	100,33
4	300-400	45,65	99,90
5	400-300	60,87	99,69
6	300-200	76,09	99,86
7	200-100	91,30	100,20
8	100-0	106,52	99,75
9	0-100	121,74	99,90
10	100-200	136,96	99,89
11	200-300	152,17	100,02
12	300-400	167,39	99,80
13	400-300	182,61	100,06
14	300-200	197,83	100,13
15	200-100	213,04	99,95
16	100-0	228,26	99,59
17	0-100	243,48	99,94
18	100-200	258,70	100,20
19	200-300	273,91	100,17
20	300-400	289,13	99,83
21	400-300	304,35	99,80
22	300-200	319,57	100,08
23	200-100	334,78	100,18
24	100-0	350,00	100,23

Tabla 5-2. Resultado de la medición de los desplazamientos de 100 mm del eje Y.

Número de medición	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medición en Y ($\pm 0,03$ mm)
1	0,00	0-100	99,73
2	17,39	100-200	100,04
3	34,78	200-300	99,97
4	52,17	300-200	99,99
5	69,57	200-100	100,17
6	86,96	100-0	99,76
7	104,35	0-100	99,99
8	121,74	100-200	99,78
9	139,13	200-300	99,95
10	156,52	300-200	100,02
11	173,91	200-100	99,96
12	191,30	100-0	99,69
13	208,70	0-100	99,77
14	226,09	100-200	100,11
15	243,48	200-300	100,02
16	260,87	300-200	100,14
17	278,26	200-100	100,18
18	295,65	100-0	100,07
19	313,04	0-100	99,82
20	330,43	100-200	100,30
21	347,83	200-300	100,07
22	365,22	300-200	99,89
23	382,61	200-100	99,69
24	400,00	100-0	100,17

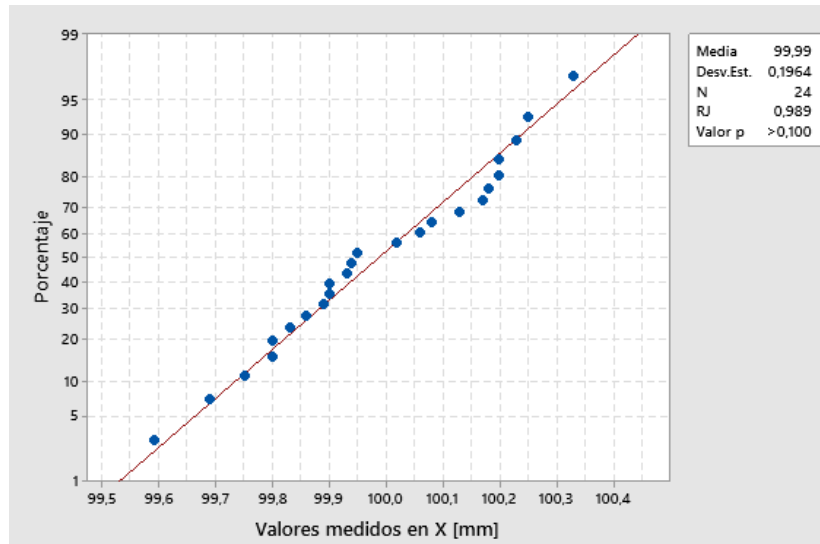


Figura 5-4. Prueba de normalidad de las muestras realizadas en el eje X. Fuente: Elaboración propia

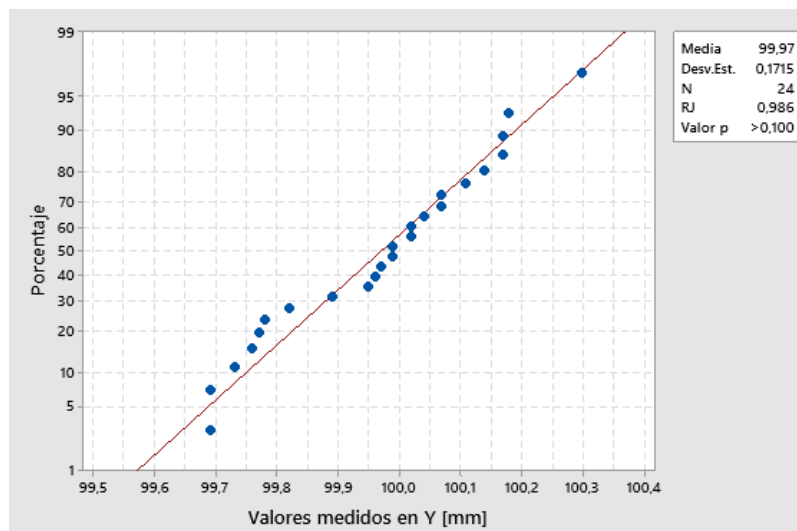


Figura 5-5. Prueba de normalidad de las muestras realizadas en el eje Y. Fuente: Elaboración propia.

La forma para garantizar la utilización de la distribución de probabilidad t-Student es verificando la normalidad de los datos. En la Figura 5-4 y la Figura 5-5, se muestra el resultado de realizar una prueba de normalidad en la herramienta estadística Minitab. Utilizando una prueba Ryan-Joiner, donde [24] establece que esta evalúa la correlación entre los datos y puntuaciones de normalidad por lo que con base al coeficiente de correlación cercano a 1 se puede determinar si los datos son normales.

De las pruebas de normalidad se tiene que para el eje X el coeficiente de correlación es igual a 0,989 y para el eje Y es igual a 0,986; por lo que por su valor tan cercano a 1 se determinó que las muestras poseen un comportamiento normal apropiado.

Con los valores que se muestran en la Tabla 5-1 y la Tabla 5-2 se calculó el valor de la desviación estándar y el valor de la varianza de las muestras.

Tabla 5-3. Promedio, desviación estándar y varianza de los datos muestreados.

	Eje X	Eje Y
Promedio	99,99 mm	99,97 mm
Desviación estándar	0,19637 mm	0,17146 mm
Varianza muestral	0,03856 mm ²	0,0294 mm ²

Como se mencionó anteriormente un nivel de confianza a partir del 95% ya el resultado llega a considerarse aceptable y robusto, para este caso se toma el valor de 98% para ser más estricto con el rango de confianza, permitiendo que el rango de valores obtenido permita verificar que la máquina posee un comportamiento preciso y cumplir con el objetivo de llegar a ser menor que 1 mm.

Cálculo del rango de aceptación promedio para el eje X a partir de las ecuaciones (5.1), (5.2) y (5.3)

$$\alpha = 1 - 0,98$$

$$\alpha = 0,02$$

$$\nu = 24 - 1$$

$$\nu = 23$$

$$t_{\alpha/2} = t_{0,01} = 2,500$$

$$99,99 - 2,500 * \frac{0,19637}{\sqrt{24}} \leq \mu \leq 99,99 + 2,500 * \frac{0,19637}{\sqrt{24}}$$

$$99,89 \leq \mu \leq 100,09$$

Cálculo del rango de aceptación promedio para el eje Y

$$\alpha = 1 - 0,98$$

$$\alpha = 0,02$$

$$v = 24 - 1$$

$$v = 23$$

$$t_{\alpha/2} = t_{0,01} = 2,500$$

$$99,97 - 2,500 * \frac{0,17146}{\sqrt{24}} \leq \mu \leq 99,97 + 2,500 * \frac{0,17146}{\sqrt{24}}$$

$$99,88 \leq \mu \leq 100,05$$

A partir de los rangos de aceptación del valor promedio en el movimiento del eje X calculados previamente, se tiene que:

$$\mu_X \begin{matrix} +0,09 \\ -0,11 \end{matrix}$$

En base a los dos límites de aceptación obtenidos, en promedio con un 98% de confianza los valores en promedio tendrán una desviación de 0,20 mm de forma general, pero con un valor en promedio de 0,09 mm en el lado positivo del valor nominal y 0,11 mm menor que el valor promedio nominal.

En el caso del eje Y, los rangos de aceptación promedio obtenidos por el movimiento del eje es el siguiente:

$$\mu_Y \begin{matrix} +0,05 \\ -0,12 \end{matrix}$$

Con un valor de confianza de 98% en el cálculo del valor promedio de los movimientos realizados por el eje Y, se tiene que la desviación promedio que va a tender el eje es de 0,17 mm que corresponde al rango general desde el máximo y mínimo, pero puede llegar a aumentar 0,05 mm y también disminuir en un valor de 0,12 mm del valor promedio obtenido.

Posteriormente se realizó cinco pruebas de 24 muestras de 100 mm cada una con la finalidad de comprobar que el promedio de las muestras se encuentre entre el intervalo de confianza, mediante la realización de prueba de hipótesis con la ayuda de la herramienta computacional de estadística Minitab 2019.

Para las diferentes pruebas realizadas tanto para el eje X y para el eje Y se obtuvo los valores estadísticos de media, desviación estándar, error estándar y un intervalo de confianza al 98% por cada muestra. Esto se muestra en la siguiente Figura 5-6 y Figura 5-7.

T de una muestra: Prueba 1 X; Prueba 2 X; Prueba 3 X; Prueba 4 X; Prueba 5 X

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 98% para μ
Prueba 1 X	24	100,028	0,234	0,048	(99,909; 100,148)
Prueba 2 X	24	99,9608	0,2319	0,0473	(99,8424; 100,0791)
Prueba 3 X	24	100,037	0,206	0,042	(99,932; 100,142)
Prueba 4 X	24	99,9571	0,2110	0,0431	(99,8494; 100,0647)
Prueba 5 X	24	99,9312	0,2426	0,0495	(99,8074; 100,0551)

μ : media de Prueba 1 X; Prueba 2 X; Prueba 3 X; Prueba 4 X; Prueba 5 X.

*Figura 5-6. Resultados de la estadística descriptiva para las pruebas del eje X.
Fuente: Elaboración propia.*

T de una muestra: Prueba 1 Y; Prueba 2 Y; Prueba 3 Y; Prueba 4 Y; Prueba 5 Y

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 98% para μ
Prueba 1 Y	24	100,024	0,134	0,027	(99,955; 100,092)
Prueba 2 Y	24	100,011	0,167	0,034	(99,926; 100,096)
Prueba 3 Y	24	99,9416	0,1694	0,0346	(99,8552; 100,0281)
Prueba 4 Y	24	99,9894	0,1855	0,0379	(99,8947; 100,0841)
Prueba 5 Y	24	99,9517	0,1856	0,0379	(99,8570; 100,0465)

μ : media de Prueba 1 Y; Prueba 2 Y; Prueba 3 Y; Prueba 4 Y; Prueba 5 Y.

*Figura 5-7. Resultados de la estadística descriptiva para las pruebas del eje Y.
Fuente: Elaboración propia.*

Como parte de la prueba se estableció la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1). Donde para el caso del eje X y el eje Y, H_0 corresponde que las medias de las pruebas tengan un valor igual a 100 mm y para el caso de H_1 se definió con que la media de las pruebas sea distinta a los 100 mm. Es decir:

$$H_0: \mu = 100 \text{ mm}$$

$$H_1: \mu \neq 100 \text{ mm}$$

Con la ayuda de la herramienta Minitab 2019, se comprueba la prueba de hipótesis a partir del resultado que el programa muestra en el valor P, este valor indica que se debe aceptar la hipótesis nula en el caso que P sea mayor al valor de significancia establecido; en este caso el valor de confianza es de 98% por lo que el valor de significancia es de 0,02, si el valor P es menor al valor de significancia entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

En la Figura 5-8, se muestra el resultado por prueba del valor P, tanto para las mediciones del movimiento en el eje X Figura 5-8 a), como también las realizadas para el eje Y Figura 5-8 b). En estas figuras se puede observar como en las 5 pruebas de cada eje, el valor P es mayor que el valor de significancia definido, por lo que determina que el eje X y el eje Y se cumple la hipótesis nula, es decir, se consideran que las medias presentan un valor promedio igual a 100 mm con un 98% de confianza.

Prueba			Prueba		
Hipótesis nula	$H_0: \mu = 100$		Hipótesis nula	$H_0: \mu = 100$	
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 100$		Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 100$	
Muestra	Valor T	Valor p	Muestra	Valor T	Valor p
Prueba 1 X	0,59	0,562	Prueba 1 Y	0,86	0,396
Prueba 2 X	-0,83	0,416	Prueba 2 Y	0,32	0,754
Prueba 3 X	0,89	0,383	Prueba 3 Y	-1,69	0,105
Prueba 4 X	-1,00	0,329	Prueba 4 Y	-0,28	0,782
Prueba 5 X	-1,39	0,178	Prueba 5 Y	-1,27	0,216

a)

b)

Figura 5-8. a) Prueba de hipótesis para el las mediciones del eje X b) Prueba de hipótesis para el las mediciones del eje Y. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-9 y Figura 5-10, se muestra las gráficas de caja para cada una de las mediciones de las pruebas realizadas para el movimiento del eje X y el eje Y respectivamente, cada una de estas en la parte inferior de la caja se muestra de

una forma más visual el intervalo de confianza del 98% y mediante un punto de color rojo el lugar en donde se ubica la hipótesis nula.

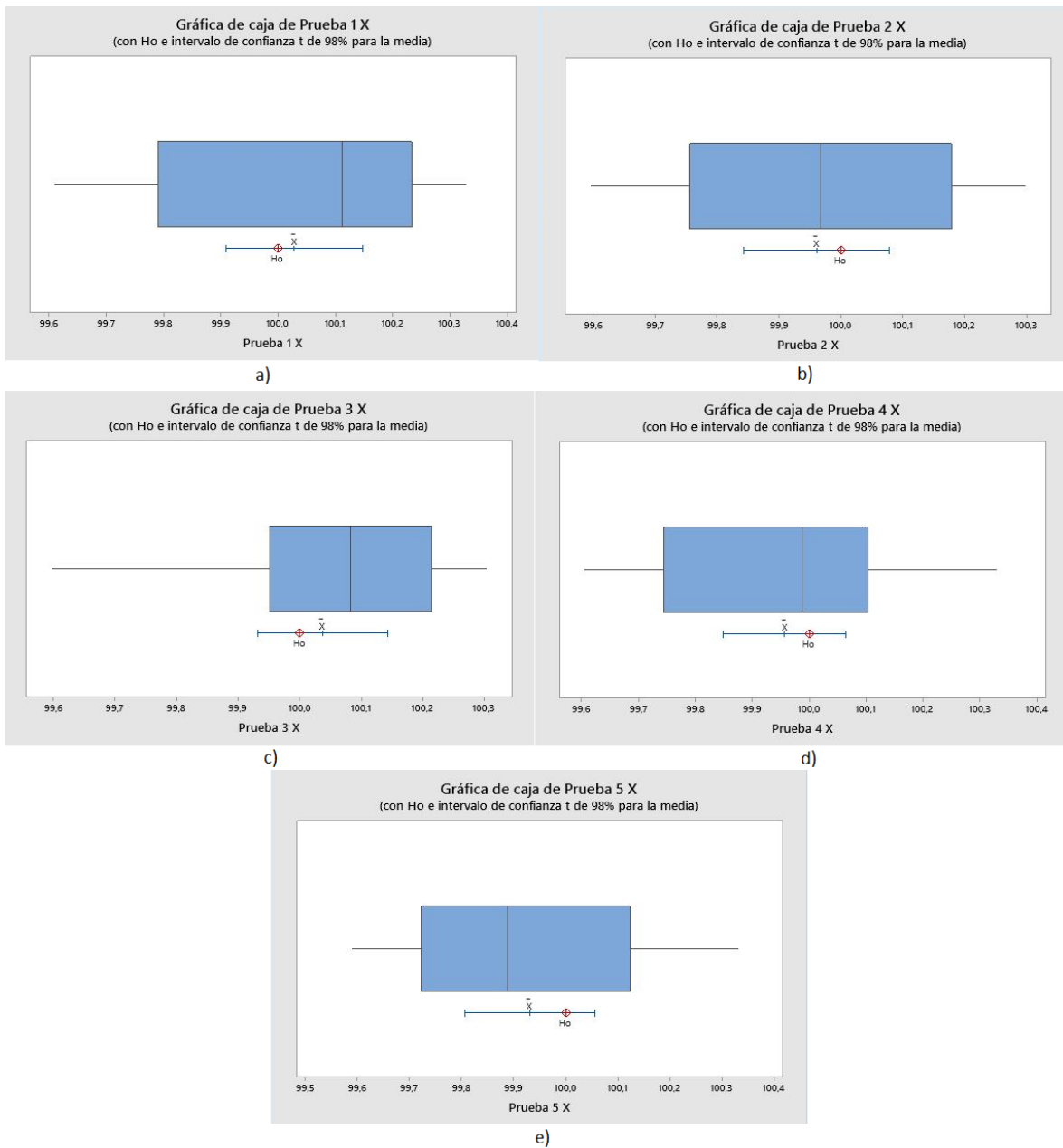


Figura 5-9. a) Gráfica de caja de prueba 1X b) Gráfica de caja de prueba 2X c) Gráfica de caja de prueba 3X d) Gráfica de caja de prueba 4X e) Gráfica de caja de prueba 5X. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-9, se muestra el resultado de las pruebas y como la hipótesis nula se encuentra dentro del intervalo de confianza para las mediciones del eje X,

por lo que se obtuvo un resultado satisfactorio ya que en ninguna de las 5 pruebas este punto se encontró por fuera. Para el caso de las pruebas del eje Y, los resultados de la Figura 5-10 demuestran que este eje cumple con la hipótesis nula ya que cada uno de los puntos se encuentran dentro del intervalo del 98% dibujado, siendo un resultado positivo para el proyecto.

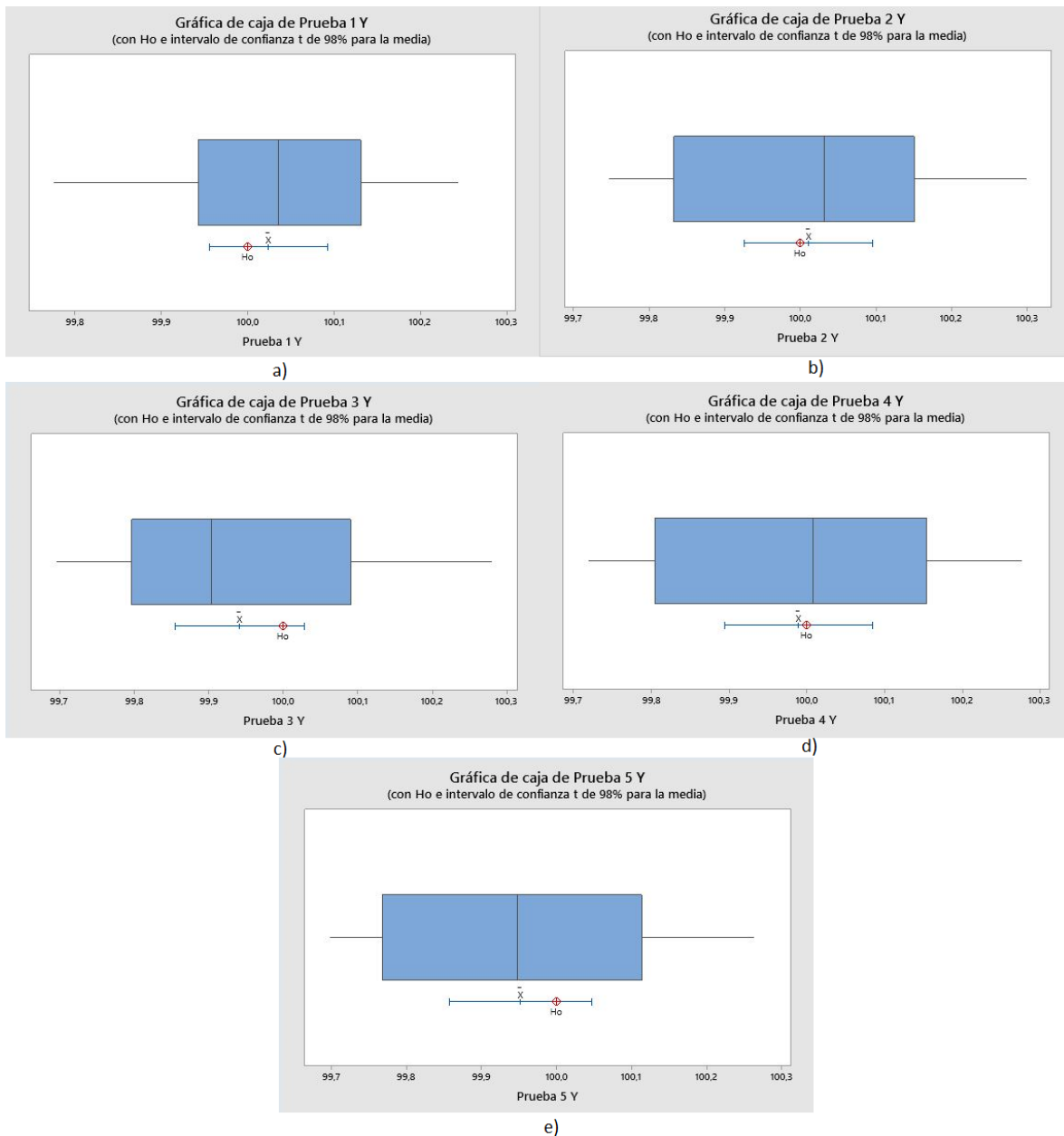


Figura 5-10. a) Gráfica de caja de prueba 1Y b) Gráfica de caja de prueba 2Y c) Gráfica de caja de prueba 3Y d) Gráfica de caja de prueba 4Y e) Gráfica de caja de prueba 5Y. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la verificación con una confiabilidad de un 98%, se calculó un valor de precisión a partir de la desviación promedio de la totalidad de los datos obtenidos en la medición, para el caso del eje X se tiene que la desviación promedio es igual a 0,18 mm y para el caso del eje Y corresponde a 0,15 mm. Para el caso de los movimientos diagonales se define como la combinación de los resultados del eje Y y X mediante el teorema de Pitágoras como se muestra en la Figura 5-11, dando como resultado un valor de 0,23 mm, siendo este un valor adecuado ya que es menor al 1 mm esperado.

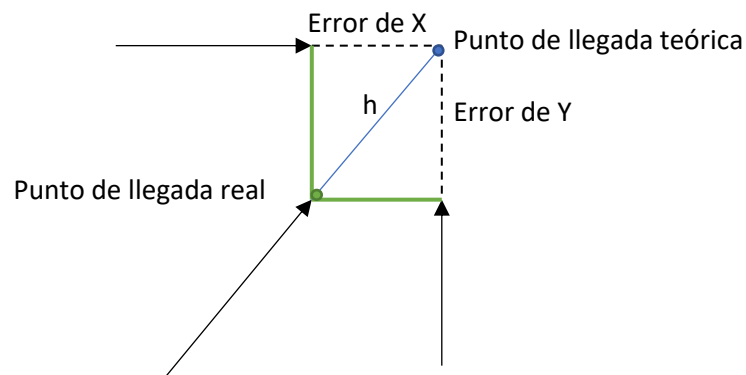


Figura 5-11. Comportamiento del error en el movimiento diagonal. Fuente: Elaboración propia

Prueba de grabado

En esta sección se realizan las pruebas para validar que la máquina sea capaz de realizar grabados mediante pruebas de realización de figuras y la comparación con un grabado de referencia, además se realizan pruebas con diferentes materiales y se establecen parámetros recomendados.

5.1.2.2 Realización de figuras

La realización de esta prueba se llevó a cabo en el centro del área de trabajo teniendo en cuenta que corresponde al lugar en donde mayor deflexión tienen las vigas, por lo que mayor desajuste podría tener la máquina y con la velocidad máxima de 1600 mm/min. Mediante estas pruebas con diferentes dimensiones de figuras geométricas permite verificar el comportamiento de la máquina frente a

condiciones límite como es el caso de figuras con tamaños pequeños con el movimiento individual de cada eje, cambios de direcciones y movimiento simultáneos de los ejes. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Prueba 1: círculos y arcos.

En la primera prueba se eligieron los círculos y arcos debido a que involucra un movimiento en donde la máquina debe tener la capacidad de variar la velocidad de los ejes y mantenerse estable en el movimiento. La prueba consta de 10 círculos con diámetros diferentes que van desde 1 mm a 10 mm y 10 arcos de diferentes radios utilizando como medio de dibujo el Inventor 2019, enviado en formato .pdf y cargado en el LightBurn para la interpretación del archivo, generación y envío del código G.

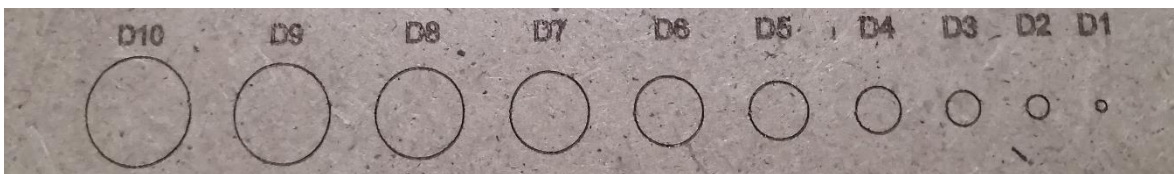


Figura 5-12. Prueba de grabado de círculos. Fuente: Elaboración propia

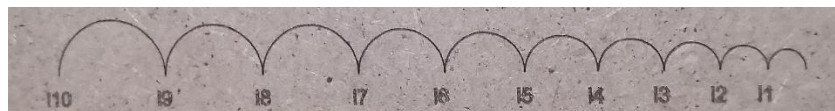


Figura 5-13. Prueba de grabado de arcos. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-12 se muestra el resultado de la prueba al grabar los círculos, se observa como desde el círculo más grande (diámetro 10 mm) al más pequeño (diámetro 1 mm) la circunferencia logró ser bien delimitada y el círculo se muestra claro y uniforme, no presenta marca en el punto de inicio y final del trazo. En el caso de la Figura 5-13 los arcos realizados se observan completos, claros, sin presencia de alteraciones debido a vibraciones y no presentan diferencias en la intensidad del trazo grabado.

- Prueba número 2: líneas diagonales.

La segunda prueba corresponde a líneas diagonales con cambio de dirección obteniendo triángulos. La implementación de líneas diagonales permite comprobar el comportamiento donde los motores de los ejes X y Y deben moverse juntos sin realizar un cambio de dirección hasta el final del trazo.

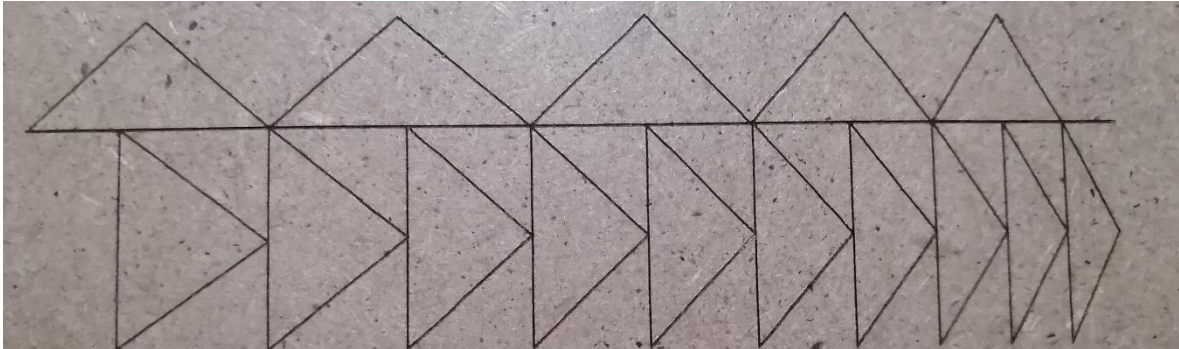


Figura 5-14. Prueba de grabado de líneas diagonales. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-14 se observa el resultado final al realizar líneas en diagonal, estas presentan un trazo uniforme y recto sin evidencia de afectación por vibraciones o cambios en la intensidad del color que demuestre afectación por diferencia en la distancia de grabado.

- Prueba número 3: figuras geométricas

La tercera prueba correspondió al grabado de figura geométricas como cuadrados y hexágonos. La finalidad de la prueba es visualizar el comportamiento de la máquina al encontrarse en situaciones de movimiento de los ejes de forma independientes con un cambio de dirección (cuadrados) y el de realizar movimiento de eje independiente y pasar a realizar un movimiento en conjunto con el otro eje (hexágonos).

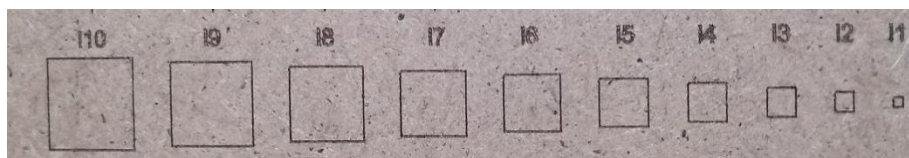


Figura 5-15. Prueba de grabado de cuadrados. Fuente: Elaboración propia.

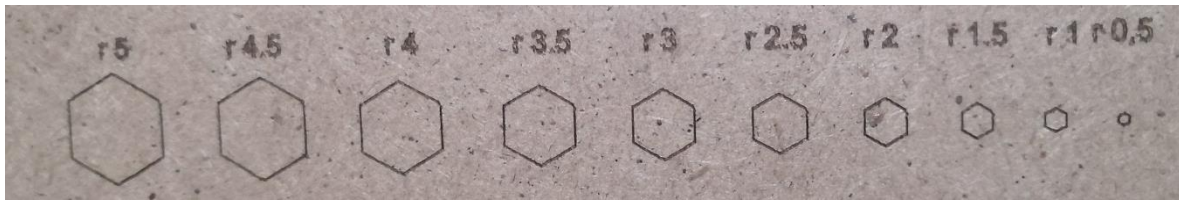


Figura 5-16. Prueba de grabado de hexágonos. Fuente: *Elaboración propia*.

En la prueba de realización de cuadrados, se obtuvo el resultado que se muestra en Figura 5-15 analizando los resultados del grabado al realizar los cambios de dirección con los lados del cuadrado se determina que no existe afectación alguna durante el movimiento independiente y el cambio de dirección, las líneas demuestran una intensidad del láser uniforme y constante.

En el caso del resultado que se muestra en la Figura 5-16 los lados del hexágono se identifican sin algún problema, con la excepción de resultado obtenido en el más pequeño, el de radio 0,5, que por el tamaño se pierden los vértices de la figura por lo que puede llegar a confundirse con un círculo.

5.1.2.3 Grabado de materiales

Como parte del proceso de validación del grabado, se realizaron pruebas de comprobación de la capacidad de grabar materiales comúnmente utilizados para proyectos de grabado derivados de madera. Entre los materiales seleccionados se encuentran:

- Papel.
- Cartón.
- MDF.
- Madera.
- Acrílico transparente.
- Acrílico negro.

La figura seleccionada para realizar grabados de prueba es la que se muestra en la Figura 5-17 esta presenta detalles pequeños, grabado con relleno, grabado de palabras pequeñas y es un grabado utilizado por la empresa como parte de sus

productos, por lo que se pone a prueba en condiciones de exigencia y de posible trabajo durante la puesta en marcha.

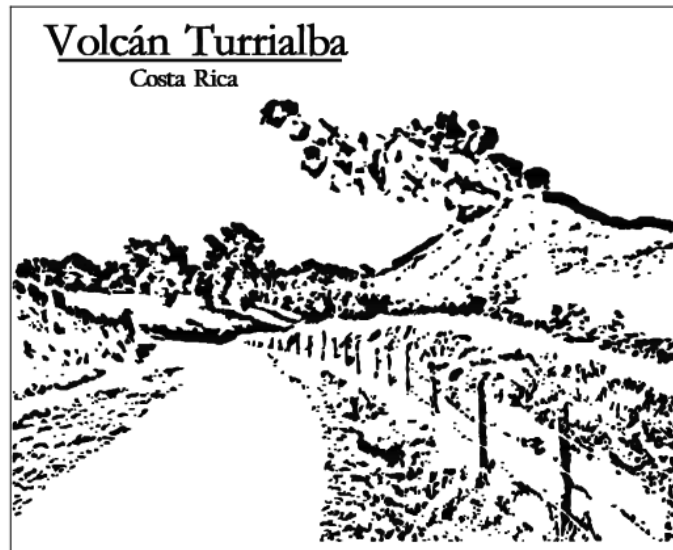


Figura 5-17. Imagen seleccionada para las pruebas de grabado. Fuente: Elaboración propia

Parte de la selección de los parámetros se llevó a cabo pruebas de escala de color, variando la potencia del láser y la velocidad de avance, tal y como se muestra en la Figura 5-18 donde se realizó para el material MDF.

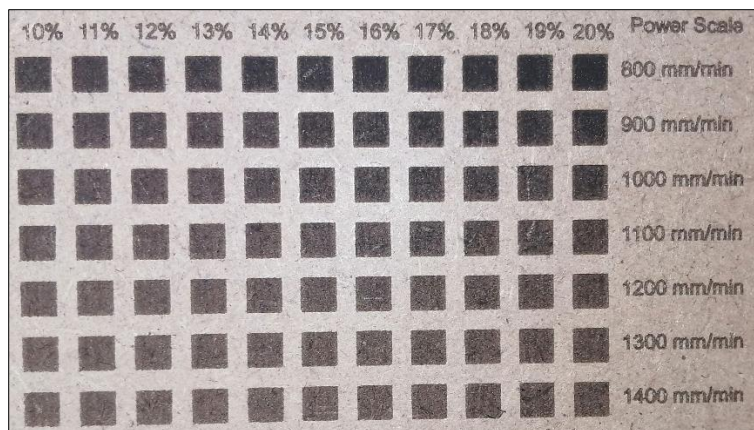


Figura 5-18. Escala de grabado para el MDF de 10% al 20% de potencia y de 800 mm/min a 1500 mm/min. Fuente: Elaboración propia.

Mediante múltiples iteraciones en donde se busca que no se realice corte únicamente un grabado superficial con parámetros en donde la imagen con menor

potencia del láser se obtenga un resultado visualmente perceptible con facilidad, sin pérdida de detalles y no ocurran manchas por material quemado.

- Grabado en papel

Durante la prueba de grabado al papel el resultado obtenido fue erróneo a pesar de la iteración con diferentes parámetros, el resultado obtenido era el papel quemado, pero no grabado. En ninguna de las pruebas se obtuvo alguna señal de ser posible lograr un posible grabado.

- Grabado en cartón.

Resultado obtenido al grabar en cartón:

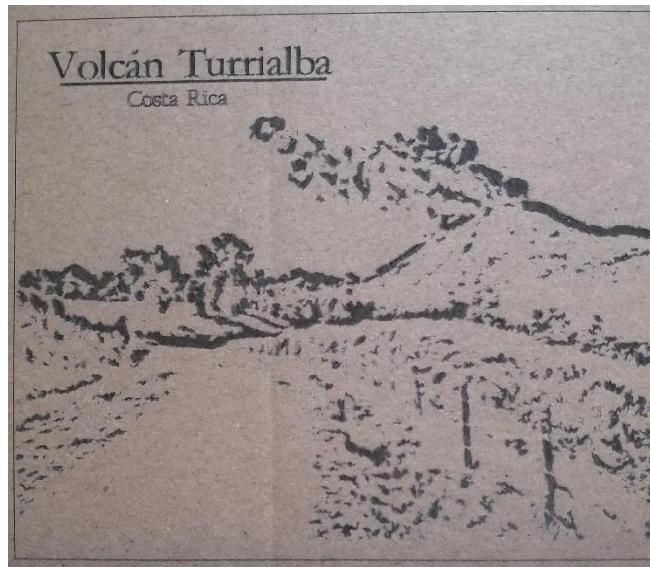


Figura 5-19. Resultado de grabado cartón. Fuente: Elaboración propia

Al grabar en cartón común de 4 mm de grosor con centro corrugado, se obtuvieron resultados en donde visualmente el grabado fue satisfactorio, pero con el inconveniente que el láser quemaba la superficie manchando al frotar el producto. Tras múltiples iteraciones los parámetros plasmados en la Tabla 5-4 se obtuvo el mejor resultado que corresponde al mostrado en la Figura 5-19.

El resultado de la Figura 5-19 al compararse con la Figura 5-17 presenta ciertos elementos donde ocurrió pérdida de información por falta de color debido a

que el láser si marca la superficie, pero no realiza el grabado. Esto ocurre en los elementos rellenos donde el grosor del elemento es menor a 0,5 mm.

- Grabado en MDF

Resultado obtenido al grabar en MDF:

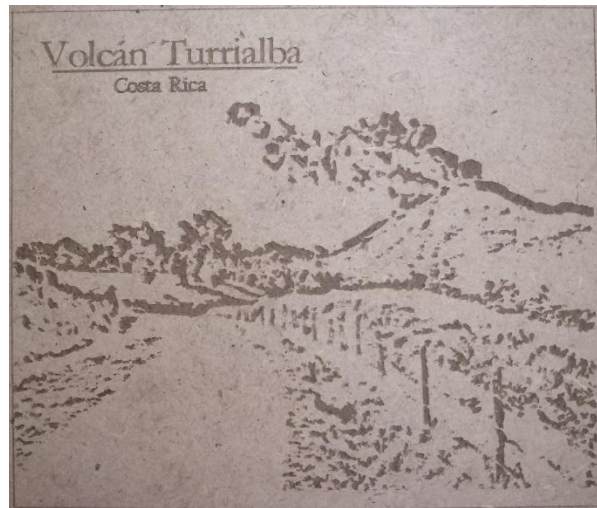


Figura 5-20. Resultado de grabado en MDF. Fuente: Elaboración propia

El grabado de MDF con los parámetros definidos en la Tabla 5-4, se muestra en la Figura 5-20 donde el grabado fue uniforme, sin muestras de bordes quemados, no mancha al tacto y la información fue plasmada de forma correcta por lo que el resultado se entiende en su totalidad y se considera como aceptado. Si se desea un color más oscuro se puede intensificar el valor de potencia al 20% mostrando resultados en donde no se quema el material manchando al tacto.

- Grabado en madera

Resultado obtenido al grabar en madera:

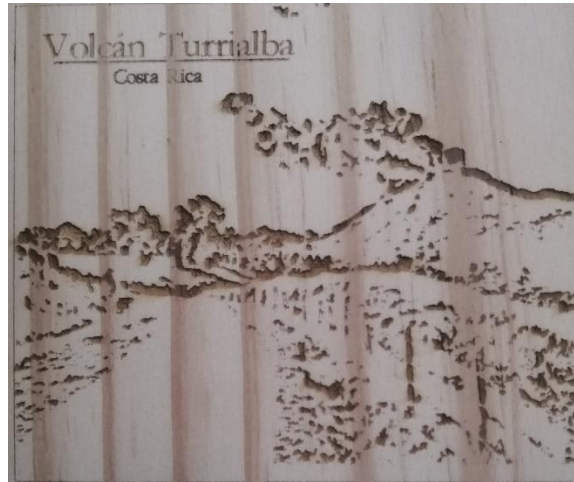


Figura 5-21. Resultado de grabado en madera. Fuente: Elaboración propia

El grabado de la madera con los parámetros definidos en Tabla 5-4 se obtuvo el resultado de la Figura 5-21 que se observa un resultado limpio y la información se logró grabar completamente llegando a ser claro la interpretación del mensaje. Un detalle importante resaltar la afectación en la intensidad del trazo en el grabado de las palabras específicamente en la “c” de Volcán, la “T” de Turrialba y la “R” de Costa Rica que se debe a que la diferencia de dureza en las vetas de la madera ocasiona que con el parámetro configurado en la zona de las vetas la intensidad del color y profundidad de grabado se vea afectado.

Para contrarrestar la afectación de las vetas se puede engrosar el tamaño de la letra a un valor mayor a 1 mm.

- Grabado acrílico transparente

Durante la prueba de grabado en acrílico transparente el resultado obtenido fue erróneo debido a que en este tipo de láser el haz de luz no grabó en la superficie, sino que continuo hasta quemar el elemento en donde se encontraba apoyada la pieza. Por lo que se tomó como que no es un material que sea posible grabar.

- Grabado acrílico negro

Resultado obtenido al grabar en acrílico negro:

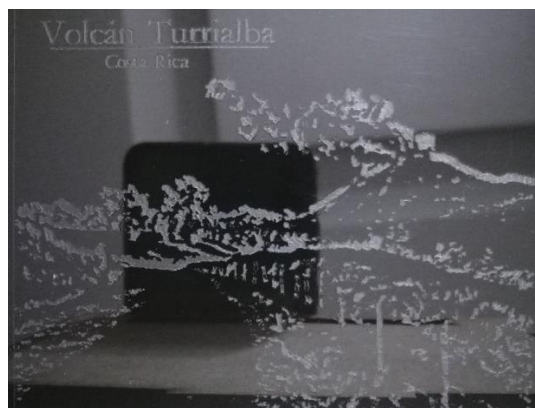


Figura 5-22. Resultado de grabado en acrílico negro. Fuente: Elaboración propia

Con los parámetros de la Tabla 5-4 para el acrílico negro se obtuvo el resultado que se observa en la Figura 5-22 donde a pesar de que en el acrílico transparente no se logró un resultado, en el acrílico color negro se obtuvo un resultado donde la información logro ser grabada en su totalidad por lo que se considera un grabado correcto. En base a este resultado se determina que los materiales acrílicos que no sean traslucidos o transparentes pueden ser grabados sin dificultad.

Tabla 5-4. Resumen de los parámetros definidos

Material	Velocidad	Potencia
Papel	N/A	N/A
Cartón	Letras pequeñas: 600 mm/min Letras grandes: 1100 mm/min Relleno: 1100 mm/min	Letras pequeñas: 5% Letras grandes: 12% Relleno: 6 %
MDF	Letras pequeñas: 700 mm/min Letras grandes: 1300 mm/min Relleno: 1300 mm/min	Letras pequeñas: 12% Letras grandes: 18% Relleno: 18%
Madera	Letras pequeñas: 700 mm/min Letras grandes: 1300 mm/min Relleno: 1300 mm/min	Letras pequeñas: 20% Letras grandes: 25% Relleno: 28%
Acrílico transparente	N/A	N/A
Acrílico negro	Letras pequeñas: 700 mm/min Letras grandes: 1300 mm/min Relleno: 1300 mm/min	Letras pequeñas: 12% Letras grandes: 18% Relleno: 18%

Como última prueba de validación del grabado, se realiza una comparación utilizando la máquina Redsail que posee Hartmade® como resultado patrón. Se

utiliza MDF como material para la prueba debido a que, con respecto a la madera, este presenta mayor uniformidad de en el color.

Para la elaboración del grabado patrón se solicitó el grabado de la imagen que se mostró en la Figura 5-17, con los valores de parámetros similares a los mostrados en la Tabla 5-4 para el MDF. Con el inconveniente que la máquina RedSail al utilizar un láser de CO2 que es distinto al del proyecto presento resultados en donde el grabado no se considera como aceptado en temas de color ya que en profundidad era apropiado. La imagen del resultado de este grabado se muestra en la Figura 5-23.



Figura 5-23. Grabado por la máquina RedSail con parámetros similares a máquina la del proyecto. Fuente: Elaboración propia

Considerando lo anterior, se realizó el grabado con los parámetros que se utiliza para la elaboración de productos de la empresa. Los parámetros son los siguientes:

- Relleno a una velocidad de 210 mm/s y el láser a 16 W.
- Borde a una velocidad de 180 mm/s y el láser a 8 W.

Con los parámetros anteriores se obtuvo el siguiente resultado:

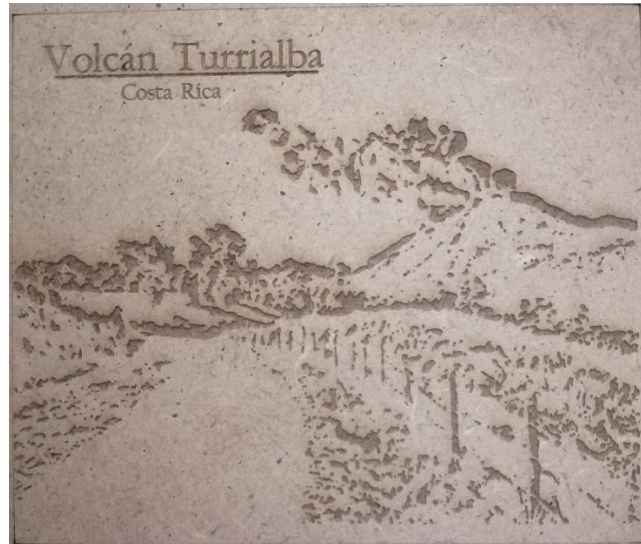


Figura 5-24. Grabado por la máquina RedSail con parámetros de producción.

Fuente: Elaboración propia.

Para la comparación de resultados se utilizó el resultado obtenido en la Figura 5-20 donde la toma de las fotografías para el grabado patrón y el resultado se toma las condiciones similares para intentar reducir la interferencia debido a condiciones externas. Las condiciones fueron las siguientes:

- Cámara de celular Huawei P30 lite.
- Mismo MDF de 3 mm.
- Distancia de la cámara al MDF 12 cm.
- Luz led blanca.
- Sin iluminación ambiental.

Para la comparación se utilizó la herramienta matemática computacional Matlab R2018a, donde se realizó y ejecutó el siguiente código:

```

I1=imread('2Patron.jpg');%Lectura de la imagen patron
size(I1)%Tamaño de la imagen
IG1=rgb2gray(I1); %Conversión a escala de grises
size(IG1)%Tamaño de la imagen en escala de grises
imwrite(IG1,'Grises_patron.jpg');%Guardar la imagen
imhist(IG1);%Histograma de la imagen en escala de grises
saveas(gcf,'Histograma_patron.jpg');

I2=imread('2Resultado.jpg');%Lectura de la imagen resultado
size(I2)%Tamaño de la imagen
IG2=rgb2gray(I2); %Conversión a escala de grises
size(IG2)%Tamaño de la imagen en escala de grises
imwrite(IG2,'Grises_Resultado.jpg');%guardar la imagen
imhist(IG2);%Histograma de la imagen en escala de grises
saveas(gcf,'Histograma_resultado.jpg');

montage({IG1,IG2})%Colocación horizontal de las fotografías en escala de grises
title('Imagen de referencia (Izquierda) vs. Imagen resultado (Derecha)')
saveas(gcf,'Comparacion_grises.jpg');
[ssimval,ssimmap] = ssim(IG2,IG1); %Comparacion de las imagenes
imshow(ssimmap,[])
title(['Resultado de la comparación: ',num2str(ssimval)])
saveas(gcf,'Resultado de la comparacion.jpg');

```

Figura 5-25. Código de Matlab para la comparación de las fotografías. Fuente: Elaboración propia.

El código se basa en cargar ambas fotografías y convertirlas de RGB a escala de grises convirtiendo el manejo de 3 matrices a solo una y obtener los histogramas para cada una de ellas y así realizar un análisis del rango dinámico que presenta cada una. Posteriormente con la función “ssimp” realizar una comparación de las imágenes obteniendo un factor de relación.

La función “ssimp” permite calcular “el índice de similitud estructural para la imagen en escala de grises” [25] por lo que permite diferenciar una imagen de otra y obtener el índice de relación entre dos imágenes que son similares. Entre más cercano sea el valor a 1 mejor corresponde a una mejor similitud.

En la Figura 5-26 se muestra la comparación lado a lado de las dos imágenes a analizar su similitud, estas ya se encuentran en escala de grises. Se puede observar que visualmente presentan resultados muy similares.

Imagen de referencia (Izquierda) vs. Imagen resultado (Derecha)

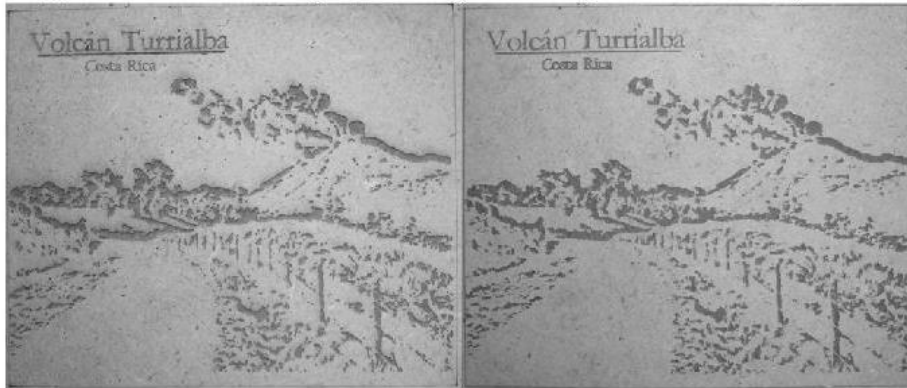


Figura 5-26. Comparación de la imagen de referencia y la imagen resultado obtenida de la máquina del proyecto. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-27, se observa el resultado de los histogramas de la imagen de referencia y la imagen resultado de la Figura 5-26 en estos histogramas se muestra que el contraste de las imágenes no es alto ya que los tonos de gris se concentran entre los 60 a los 200 y no abarcan todo el rango dinámico. Comparando ambos histogramas se observa similitud en el comportamiento de la gráfica; la cresta más alta se encuentra cerca del valor de 175 para ambos histogramas y se debe al fondo de las imágenes que presentan el mismo tono; en el caso de la cresta que se encuentra cerca de los 125 para la imagen de referencia corresponde al grabado realizado, en el caso del histograma de la imagen de referencia la cresta se encuentra cerca de los 135 o 140 siendo un valor cercano en la tonalidad de los grabados.

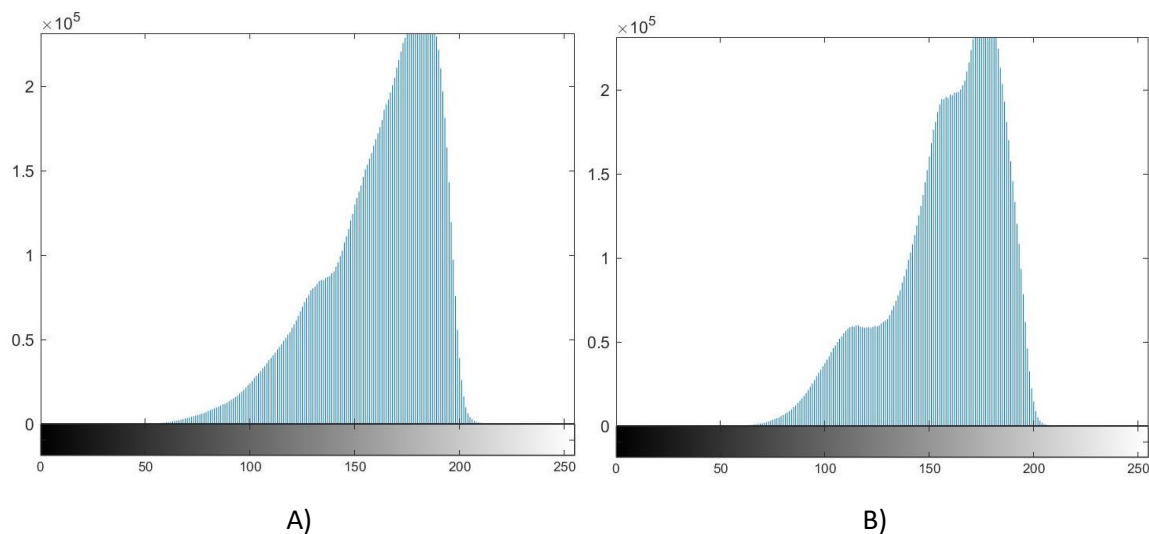


Figura 5-27. Histogramas del grabado en escala de grises. A) Grabado de referencia B) grabado resultado. Fuente: Elaboración propia.

Al ejecutar la función “ssim” entre las dos imágenes se obtuvo un índice de similitud de un 0,75739 es decir un 24,2% corresponde a el valor que difiere una imagen de la otra, que aspectos de error fotográfico y manchas en el material pueden estar causando que el valor aumente, por lo tanto, se considera un valor aceptado ya que la similitud puede ser realmente aún mayor por lo que se obtiene una buena calidad del grabado.



Figura 5-28. Comparación de la imagen de referencia con la imagen resultado y su índice de similitud. Fuente: Elaboración propia

Un aspecto importante que destacar es el tema del consumo, la máquina del proyecto logró este resultado únicamente con 1 W en el láser mientras que la máquina Redsail requiere de 16 W para obtener un resultado similar, siendo un 6,25% de la potencia utilizada para obtener el grabado de referencia. Un detalle es la capacidad de penetrar el láser de CO2 que utiliza la Redsail presenta mucho mayor capacidad de obtener profundidad en el grabado obteniendo resultados como el que se mostró en la Figura 5-23 donde a pesar de no lograrse color en las partes grabadas si desbaste marcando el dibujo, aspecto que el diodo láser del proyecto le resulta imposible.

5.2 Simulación de elementos mecánicos

En esta sección se muestran el resultado de simulaciones realizadas con el software de dibujo 3D Autodesk Inventor 2019 y SolidWorks 2018, esto con el fin de validar que los elementos importantes del diseño realizado cumplan con las especificaciones de diseño.

Un aspecto importante por comprobar es el cumplimiento del área de trabajo especificada en los requisitos de diseño. Para validar que se llegó a las medidas acordadas, se utilizó la herramienta de dibujo Inventor 2019, donde como se muestra en la Figura 5-29 se realizó un modelo en donde se ubica el carrito que mueve el eje Z con el láser en cada una de las esquinas de la estructura compuesta por los ejes X y Y, y se realiza la medición de la distancia desde el punto por donde sale el láser.

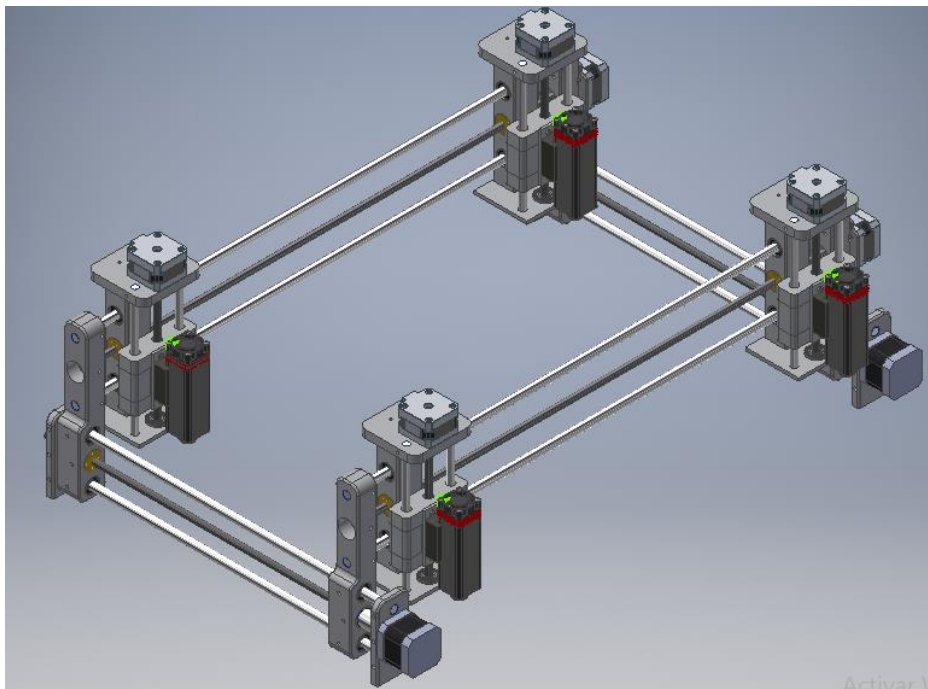


Figura 5-29. Modelo para verificar las dimensiones del área de trabajo obtenida.

Fuente: Elaboración propia

La longitud obtenida del área de trabajo para el eje X, que corresponde al eje más largo, se había definido como especificación de diseño con la dimensión

mínima igual 50 cm, como parte del proceso de diseño se tomó la decisión de ajustarse a los 50 cm por temas de tamaño. En la Figura 5-30 se muestra el modelo y la longitud de 500 mm que es igual a 50 cm para el eje X, obteniendo la medida esperada en el área de trabajo y cumpliendo con la especificación.

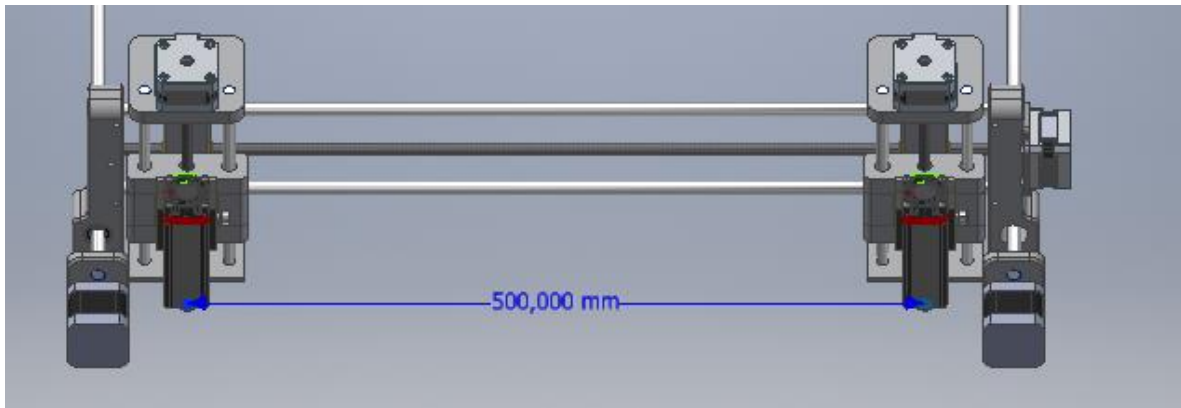


Figura 5-30. Área de trabajo del eje X. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-31 se tiene la longitud obtenida en el modelo para el área de trabajo en sentido del eje Y en el diseño realizado. El eje Y en la especificación de diseño se definió que 25 cm corresponde a la longitud mínima esperada. En el modelo realizado se obtuvo una longitud de 35 cm, por lo que se obtuvo un aumento de un 40%.

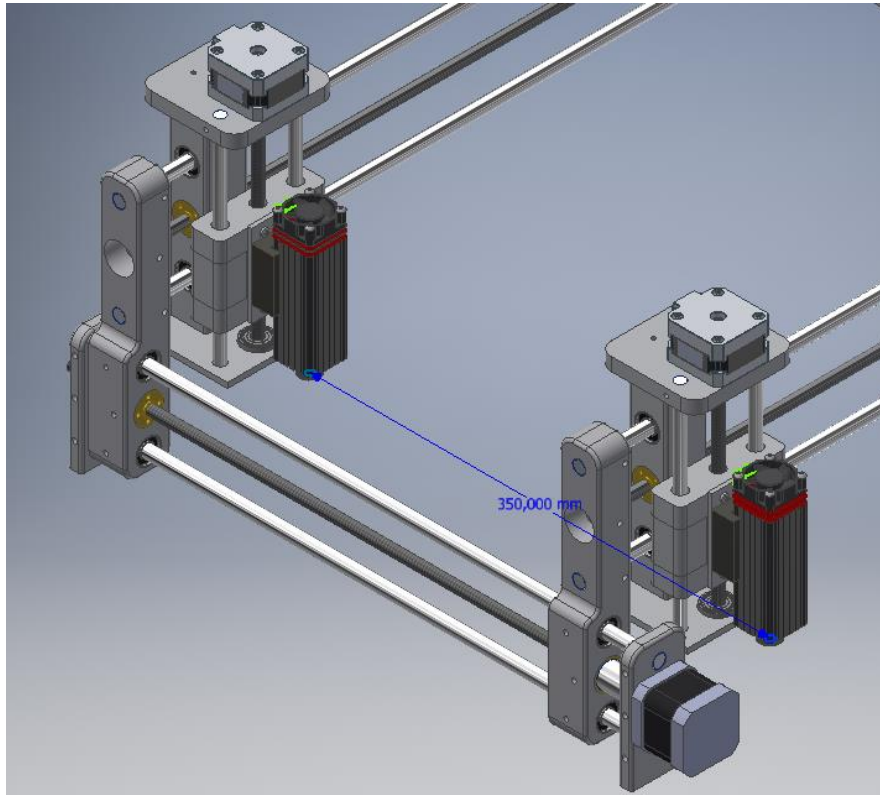
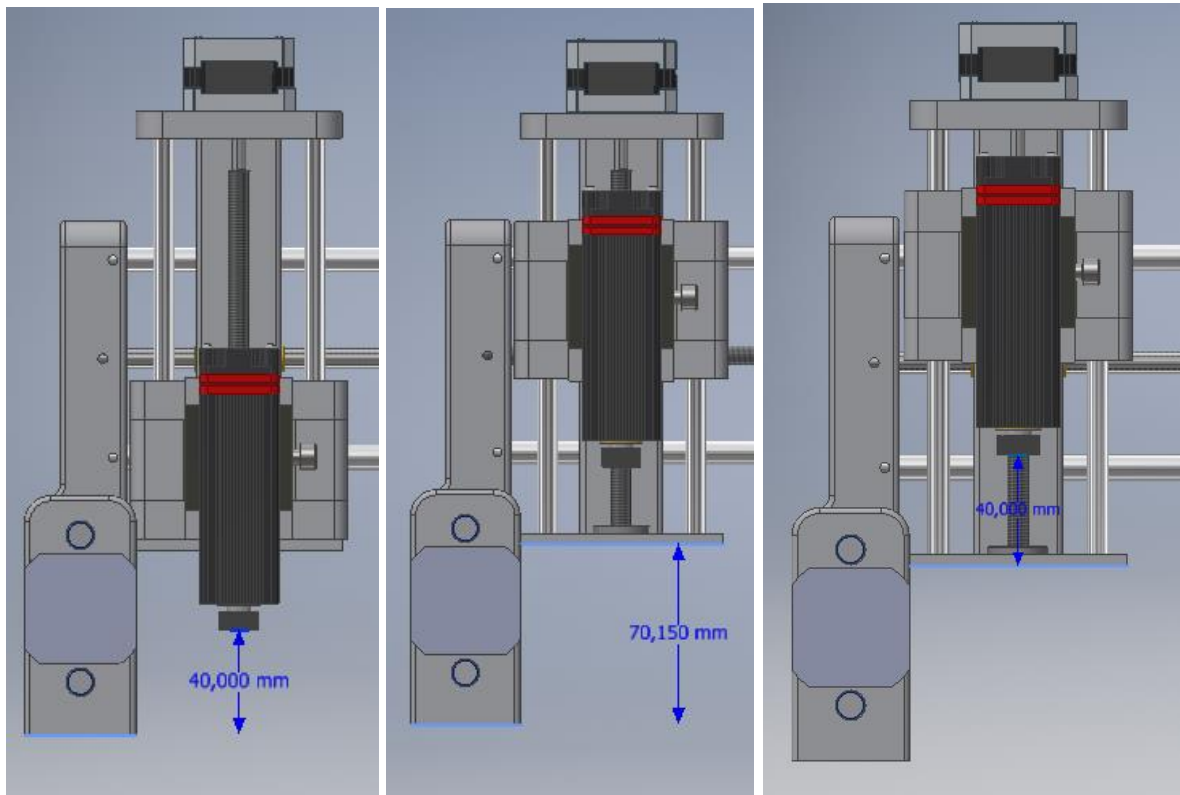


Figura 5-31. Área de trabajo del eje Y. Fuente: Elaboración propia

El láser como parte de la distancia focal se tiene que el máximo debe ser de 40 mm por lo que la altura del láser respecto a la base posee un valor de 40 mm tal y como se muestra en la Figura 5-32.A) en el caso de ser menor el usuario tiene la posibilidad de elevar el eje Z y obtener la distancia focal en la que este calibrado el láser. La distancia de la base a la parte inferior del eje Z corresponde a 70,150 mm como se observa en la Figura 5-32.B), en las especificaciones de diseño se esperaba un valor mayor a 50 mm, pero a pesar de que se diseñó a un valor mayor, esto se debe a un tema de seguridad por lo que se recomienda la utilización de piezas no mayores a 60 mm y utilizar esos 10,15 mm para el traslado seguro del láser, aun así en la Figura 5-32.C) se muestra que el eje Z tiene la capacidad de mantener los 40 mm desde la base del eje Z al láser, pero es con el fin de obtener 10 mm de espacio de seguridad.



A)

B)

C)

Figura 5-32. Área de trabajo del eje Z. A) Distancia del láser a la base B) Área de trabajo Z. C) Distancia del láser con respecto al área de trabajo máxima. Fuente: Elaboración propia

Un elemento de suma importancia en el diseño de los ejes corresponde a las vigas por donde el eje X y el eje Y se deslizan para llegar a las ubicaciones deseadas. Mediante la herramienta de dibujo 3D SolidWorks 2018 se analizó el comportamiento estático de las vigas bajo la aplicación de la fuerza que deben soportar.

En la Figura 5-33 y la Figura 5-34 se presenta el resultado de deflexión obtenido mediante el análisis del modelo por la herramienta de dibujo para el eje X y el eje Y respectivamente.

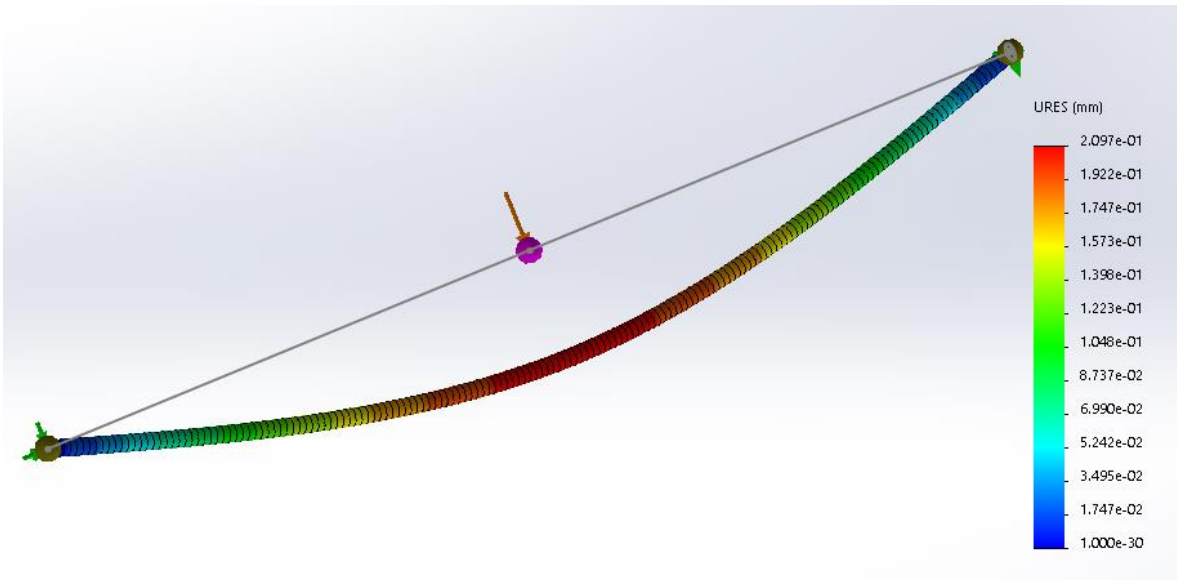


Figura 5-33. Deflexión de la viga del eje X. Fuente: Elaboración propia

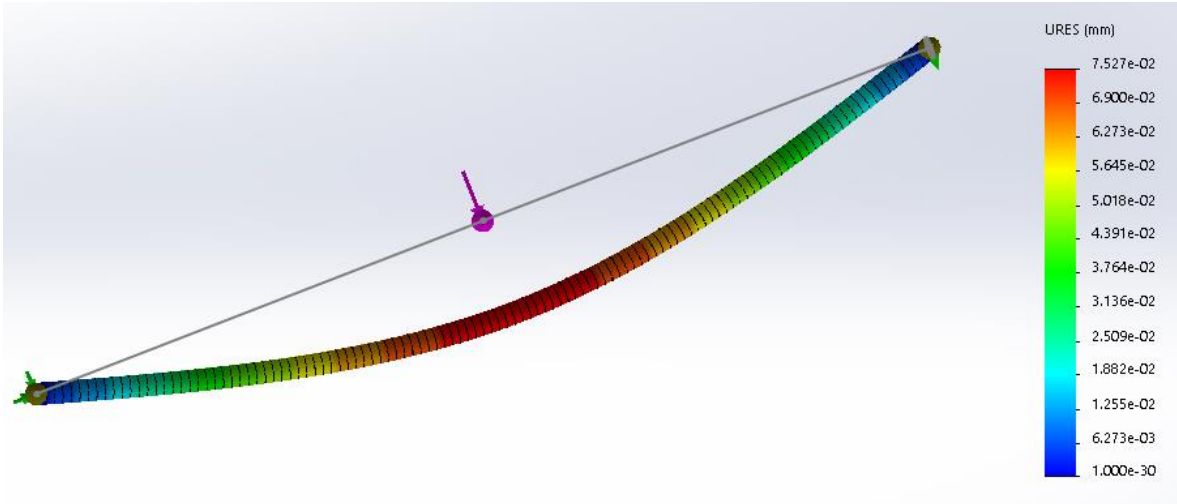


Figura 5-34. Deflexión de la viga del eje Y. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-33 y Figura 5-34, se muestra la deformación de la viga del eje X y eje Y que presentan una deformación con la forma de la curva elástica por el desplazamiento que genera la aplicación de la fuerza, tal y como se mencionó en el diseño la curva es en el sentido de la aplicación de la fuerza. En la escala del lado derecho se determina que el mayor valor de deflexión que presenta la viga del eje X según el modelo es de 209,7 μm y para el caso del eje Y corresponde a 75,27 μm .

Con la suma de ambas deflexiones se obtiene que la mayor deflexión que el sistema podría generar es de 284,27 μm , obteniendo un factor de seguridad de 3,5 utilizando a 1 mm como valor teórico.

Un segundo elemento de importancia es el encargado de realizar la función de transmitir la potencia, en la Figura 5-35 y Figura 5-36 se muestra la simulación del comportamiento del elemento frente a las cargas en el eje X y Y respectivamente, debido a que corresponden a los ejes de mayor importancia y que se encuentran en un trabajo contante.

En la Figura 5-35 se muestra como para las condiciones del eje X, el elemento presenta un factor de seguridad igual a 19 siendo un valor apropiado ya que determina que el elemento es capaz de soportar sin problemas las condiciones de carga y difícilmente puede llegar a fallar, de igual forma sucede con la Figura 5-36, donde se muestra el elemento de transmisión de potencia para el eje Y con un valor de seguridad igual a 24, lo que verifica el proceso de diseño y la adecuada implementación en la máquina.

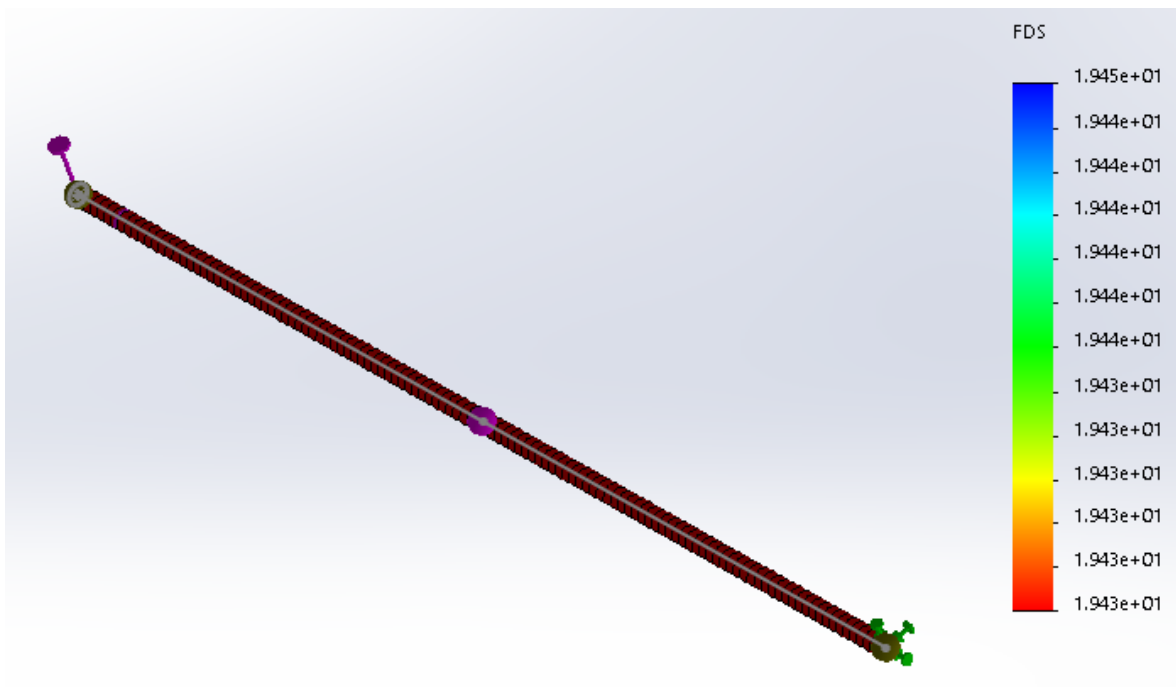


Figura 5-35. Simulación de elemento transmisor de potencia del eje X

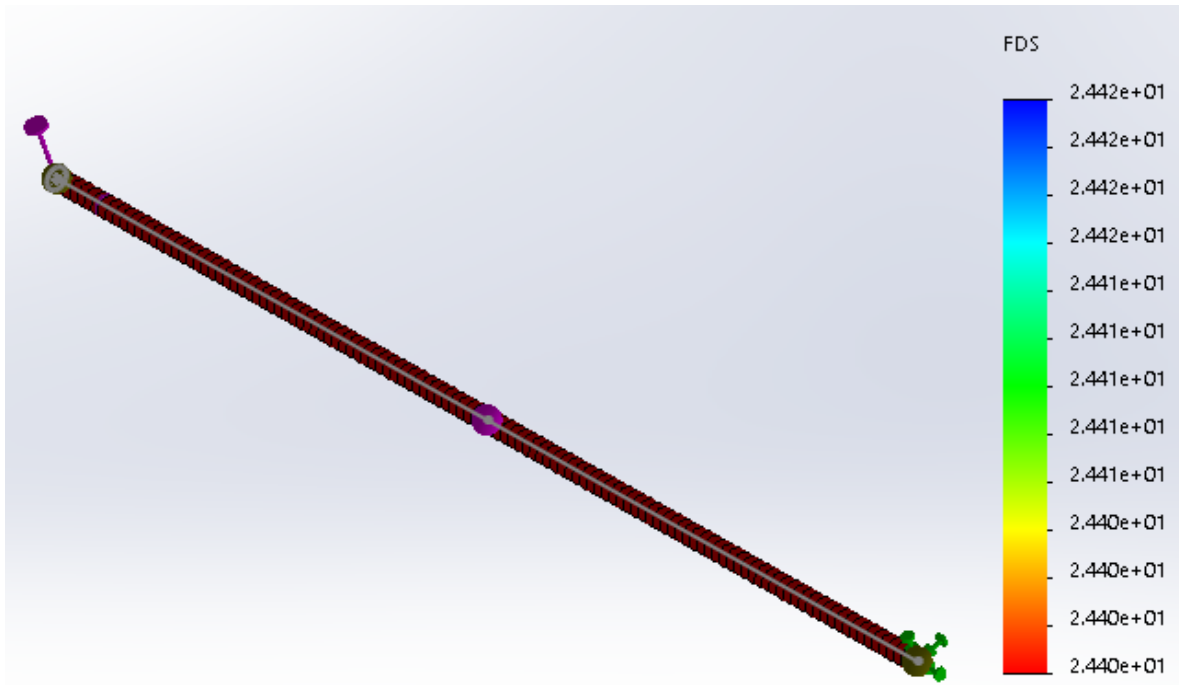


Figura 5-36. Simulación del elemento transmisor de potencia del eje Y. Fuente: Elaboración propia.

El tercer elemento corresponde a el material estructural encargado de soportar el peso de los diferentes ejes, peso que se distribuye por diferentes piezas estructurales que compone cada uno de los ejes que posee el sistema. Este material corresponde al Acrilonitrilo estireno acrilato (ASA) seleccionado en el capítulo de Generación y Selección de concepto, que presenta una resistencia de 35 MPa.

Considerando que el proceso de manufactura es impresión 3D, donde es poco común que la pieza se manufacture totalmente sólida, es decir, el relleno no es al 100% del material, sino que se realiza una estructura interna con el material y por lo tanto se presente un comportamiento anisotrópico. La comprobación de la capacidad de soportar esfuerzos se llevó a cabo mediante la herramienta computacional SolidWorks 2018 con un comportamiento sólido e isotrópico, por lo tanto, los resultados de factor de seguridad se esperan considerablemente altos (mayores a 10) por el comportamiento anisotrópico y será multiplicado por un cuarto en el cálculo por la manufactura interna no sólida como medida conservadora en el resultado, y con deflexiones no mayores a los 20 μm .

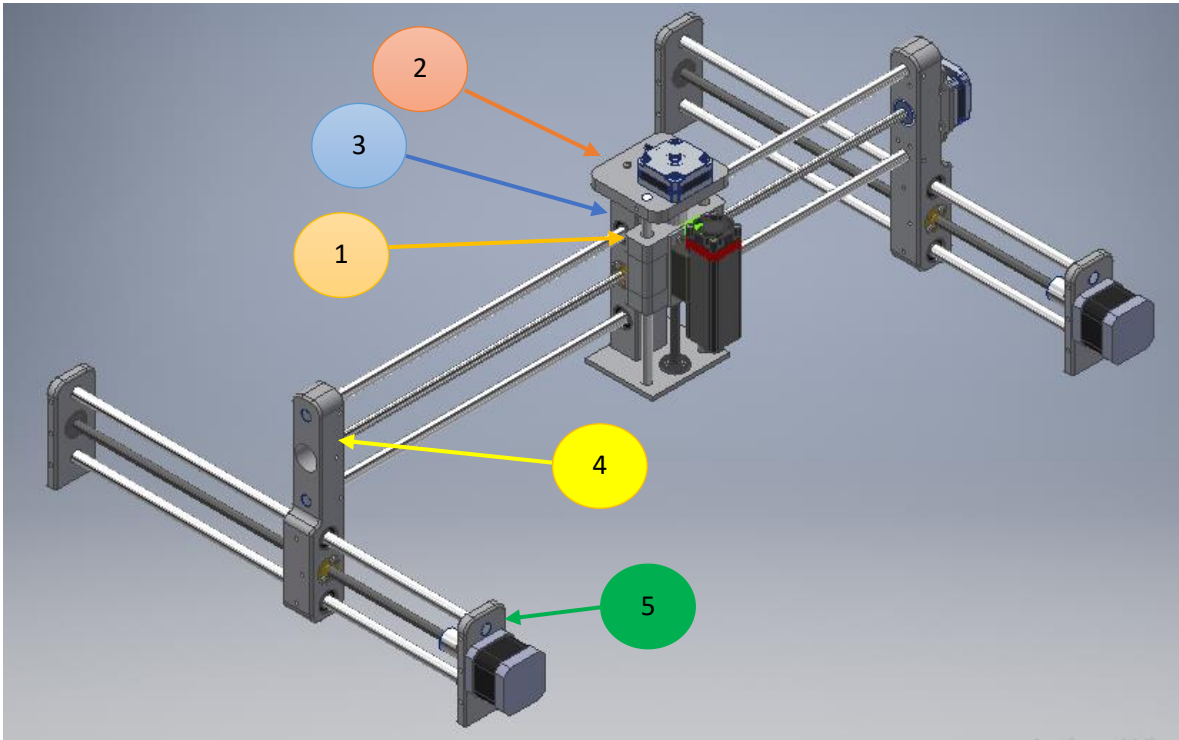


Figura 5-37. Enumeración de piezas modeladas. Fuente: Elaboración propia

La pieza de la Figura 5-37 con el numero 1 corresponde a la pieza que soporta el peso del eje Z (láser) de forma directa, en esta pieza se encuentra la tuerca que, por medio del movimiento giratorio de la varilla roscada, esta tuerca permite que el láser tenga la posibilidad de aumentar o disminuir su distancia con respecto a la base de la máquina. Esta pieza soporta en peso del láser y el elemento en donde se encuentra sujeto al eje.

Por medio de una simulación de esfuerzos presentes en la sección en donde se encuentra la tuerca, se obtuvo la distribución de esfuerzos a través de la pieza que se muestra en la siguiente Figura 5-38

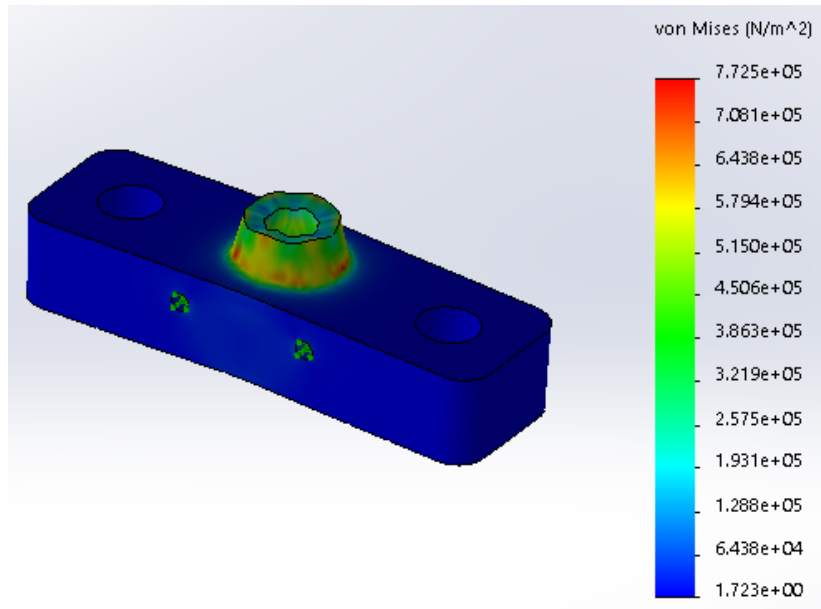


Figura 5-38. Esfuerzo de Von Mises de la pieza que soporta el peso del láser para elevación. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-38 se muestra que con las condiciones de carga la pieza presenta un esfuerzo de Von Mises máximo de $0,7081 \text{ MPa}$ por lo que, con la resistencia del material, el elemento presenta un factor de seguridad conservador igual a 12,3, este valor es alto tal y como se espera ya que se busca que la pieza soporte tanto el láser actual sin problema como cualquier eventual cambio o modificación por parte del usuario en el futuro.

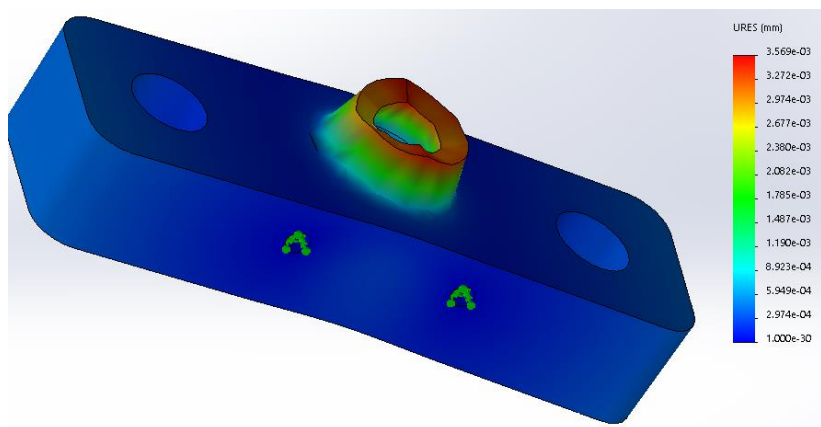
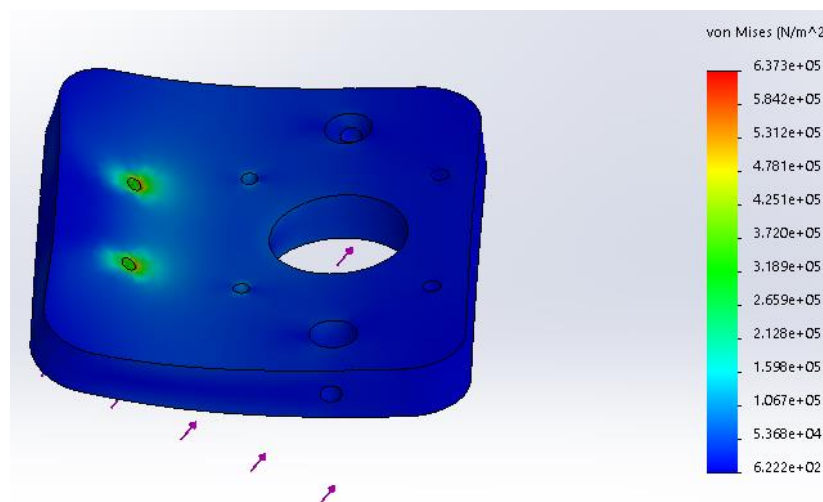


Figura 5-39. Desplazamiento debido a la deformación en la pieza que soporta el peso del láser para elevación. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-39 se observa que el desplazamiento que tiene la sección de la pieza debido a la deformación que ocasiona el peso que debe soportar, es de aproximadamente $3,569 \mu m$ siendo un valor pequeño que se vuelve no perceptible en el sistema.

La pieza de material ASA que soporta el peso de los componentes del láser y el sistema de elevación del eje Z, esta corresponde a la que se muestra en la Figura 5-37 con el número 2.



*Figura 5-40. Esfuerzo de Von Mises de la pieza que soporta el peso del eje Z.
Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 5-40 se muestra la simulación y el resultado de esfuerzo de Von Mises al agregar la condición de carga que debe soportar esta pieza del eje Z, se observa como el esfuerzo máximo de Von Mises a soportar es de aproximadamente $0,6373 MPa$, con el valor de resistencia del material ASA se calculó el factor de seguridad que con el factor para obtener un resultado conservador se obtiene que presenta un valor igual a 13. Siendo un valor alto esperado este elemento logra soportar los elementos que componen el eje.

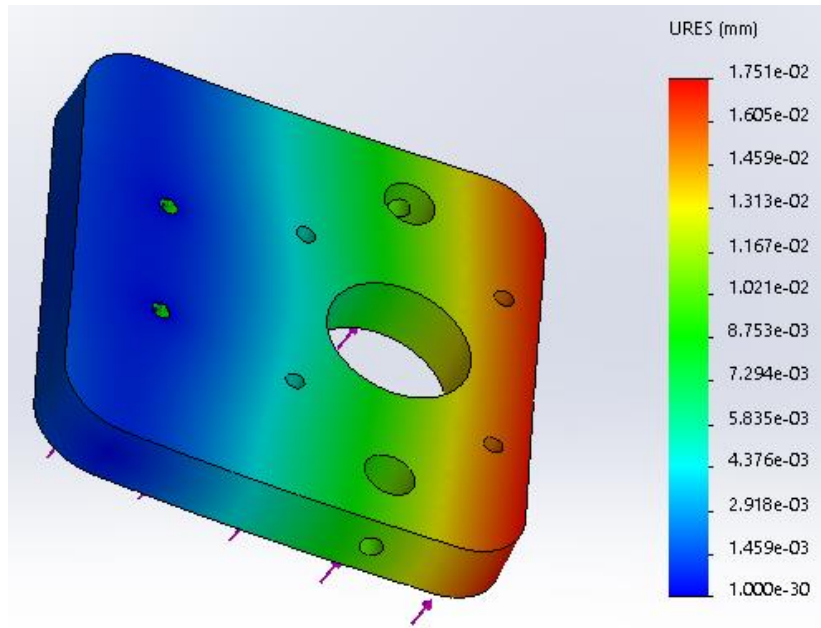


Figura 5-41. Desplazamiento debido a la deformación en la pieza que soporta el peso del eje Z. Fuente: Elaboración propia

EL valor de deflexión que la pieza puede llegar a presentar es de aproximadamente $17,51 \mu m$ en la zona roja que corresponde a la orilla de la pieza, como se muestra en la Figura 5-41, pero la zona en color verde es donde se encuentra los ejes del eje Z y a partir de la escala mostrada corresponde a un valor aproximado de $8,753 \mu m$, siendo prácticamente la mitad de la distancia de la deflexión máxima (zona roja) y menor al máximo esperado por lo que se toma como aceptado para la implementación.

La pieza que se muestra en la Figura 5-37 con el número 3, corresponde al elemento guía del eje X y que soporta la totalidad del eje Z.

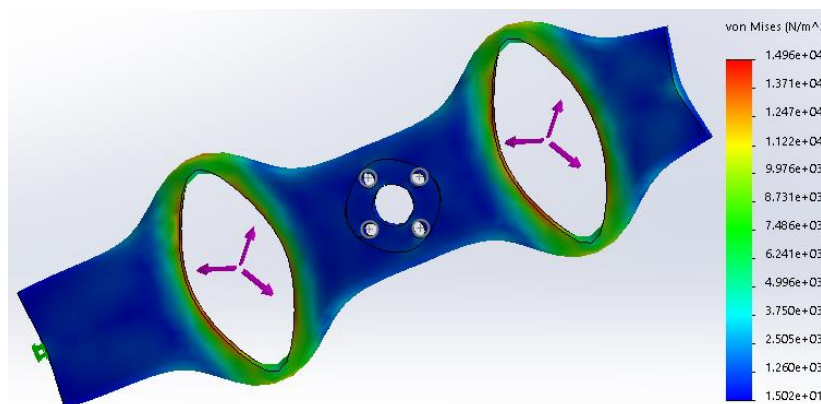


Figura 5-42. Esfuerzo de Von Mises de la pieza guía del eje X. Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo de Von Mises de la pieza guía del eje X se muestra en la Figura 5-42, se observa que el valor de esfuerzo máximo es aproximadamente $14,96 \text{ KPa}$, siendo un valor bajo con respecto al valor de resistencia del material el factor de seguridad es de 584 el cual resulta excesivamente alto. El detalle considerado es la tuerca del medio, que corresponde a la varilla roscada que es mayor a los agujeros de los ejes guías del eje X, por lo que reducir el grosor de las paredes alrededor de los agujeros para reducir el factor de seguridad y no mostrar un valor sobredimensión, ocasiona un aspecto visual no agradable y posible concentrador de esfuerzos por el cambio de dimensión, por lo que no se consideró realizarlo.

Un aspecto que se consideró al reducir el grosor de pared es que ocasiona la utilización de menor cantidad de material por lo que es un menor costo y puede resultar beneficioso en el proyecto, sin embargo, el beneficio sería de 100 colones aproximadamente por lo que se consideró muy bajo como para sacrificar el aspecto visual de la pieza, por estas razones, la pieza se dejó con el diseño mostrado.

La Figura 5-37 con el número 4 corresponde a la pieza que se encarga de fijar las barras circulares que soportan el eje X y sirve de riel guía para el eje Y. En este elemento se analiza el esfuerzo en el punto crítico, que corresponde al agujero superior debido a que por gravedad este es el que soporta el peso con menor cantidad de material ASA.

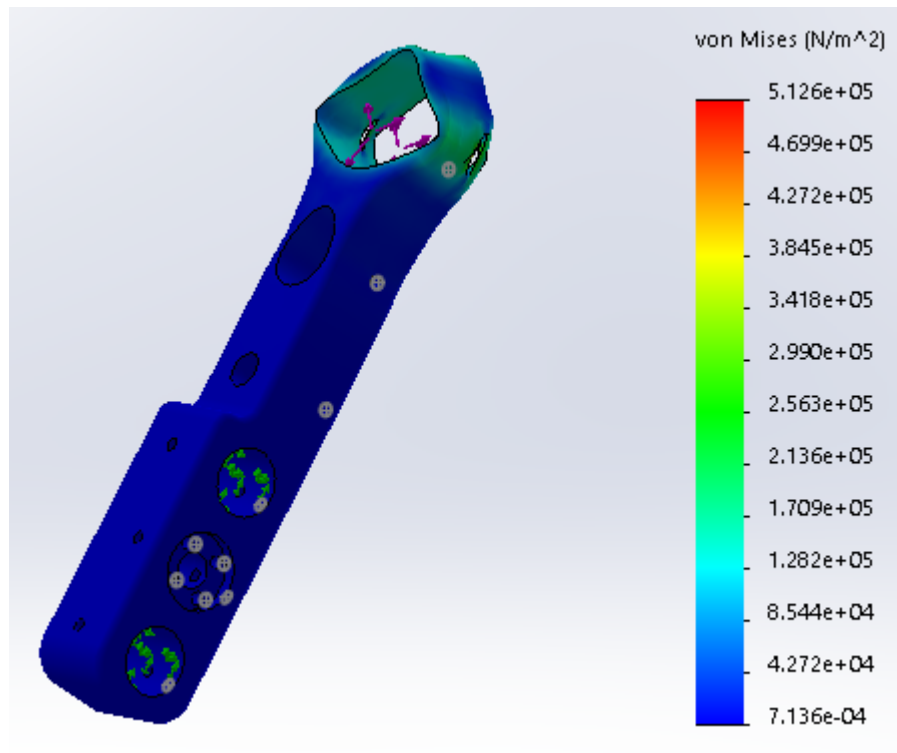


Figura 5-43. Esfuerzo de Von Mises de la pieza de soporte del eje X y guía del eje Y. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5-43 se muestra la simulación del agujero bajo la condición de carga que debe soportar, donde se evidencia que el esfuerzo de Von Mises corresponde a $0,5126 \text{ MPa}$, que tomando en cuenta la resistencia del material y el factor conservador el factor de seguridad es de 17. Siendo un valor elevado como se esperaba pero que garantiza el funcionamiento y durabilidad.

La Figura 5-37 con el número 5, corresponde a la pieza que se encuentra en las esquinas del eje Y y se encarga de dar soporte a la estructura.

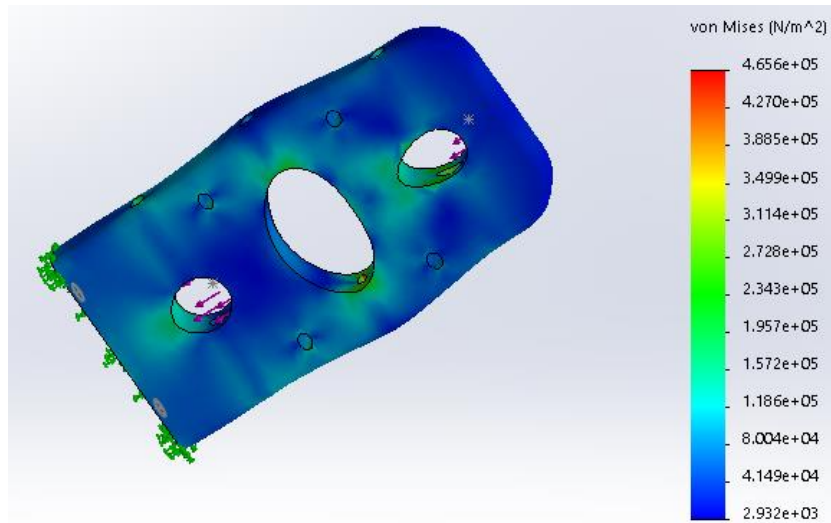


Figura 5-44. Esfuerzo de Von Mises de la pieza de soporte de la estructura de los ejes. Fuente: Elaboración propia

Bajo la condición de carga del sistema la pieza que soporta la estructura de ejes presenta un esfuerzo de Von Mises máximo de aproximadamente $0,4656 \text{ MPa}$, que con la resistencia que presenta el material y el elemento conservador presenta un factor de seguridad de 18. Valor que resulta elevado tal y como se esperaba, pero es importante resaltar que parte de las dimensiones de esta pieza se deben a la altura de separación de los rodamientos, el motor y la altura de los ejes, por lo que reducir las dimensiones para ajustar el valor de factor de seguridad no fue posible, por lo que se realizó en estas dimensiones y obteniendo el resultado mencionado.

5.3 Comprobación del funcionamiento de la botonera

Para la comprobación del funcionamiento de la botonera en conjunto con el código realizado, se emplea el software para el control mediante la computadora llamado “GRBL Laser”, debido a que la interfaz presenta mejor visualización de la consola de instrucciones por lo que permite verificar de mejor forma el adecuado funcionamiento.

Un aspecto importante por destacar es que en la sección de Diseño lógico del capítulo de Propuesta de Diseño se mostraron las partes del código implementado, dentro de la escritura del código, se programaron mensajes

dependiendo del botón presionado como indicador del funcionamiento del código, por lo tanto, a falta de un simulador que permita mostrar el estado de las variables y ejecución de las funciones, la prueba de comprobación corresponde a la visualización del mensaje correcto al presionar determinado botón.

En la Figura 5-45 se muestra el funcionamiento del botón pulsador al ser conectado sin el circuito antirrebotes diseñado. En la Figura 5-45.A) se observa como al presionar una vez el botón, se activó cuatro veces la función de realizar el movimiento en sentido del eje X positivo, por lo que en la Figura 5-45.B) muestra que, con un avance de 0,1 mm por detección del botón, el eje X se movió 0,4 mm. Caso contrario sucede al conectar el botón pulsador al circuito antirrebotes, como se muestra en la Figura 5-46.A) donde al presionar el mismo botón una vez la instrucción fue ejecutada una vez, por lo que en la Figura 5-46.B) la coordenada indica que solo se movió los 0,1 mm.

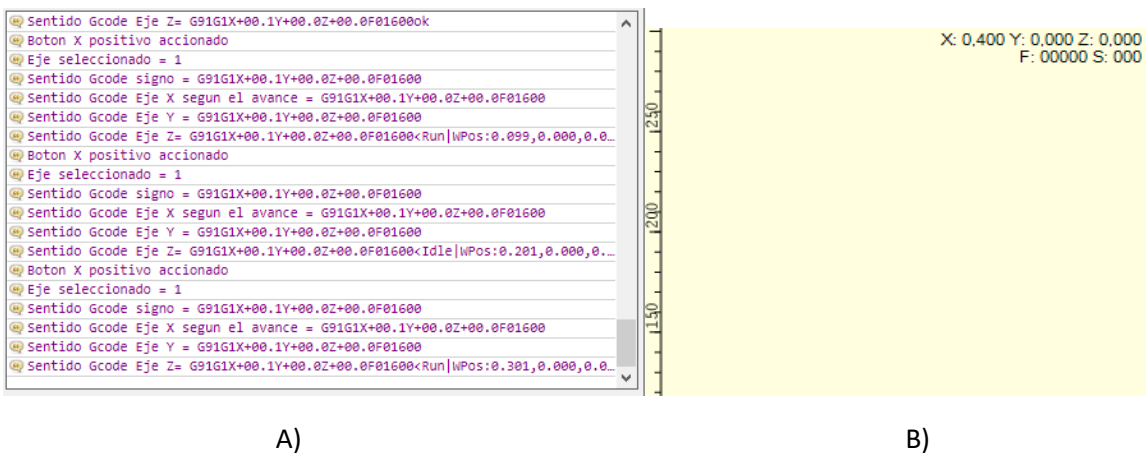
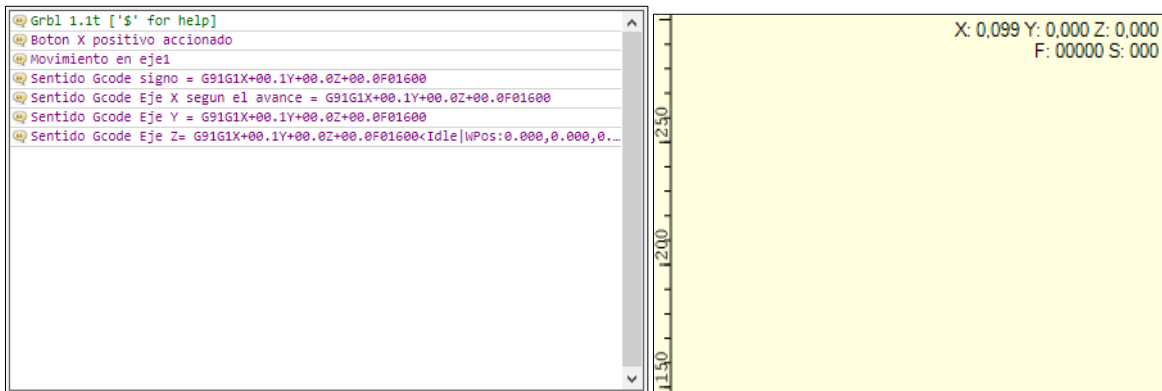


Figura 5-45. Prueba de botón sin circuito antirrebotes A) Mensaje desplegado B) Coordenada reportada. Fuente: Elaboración propia

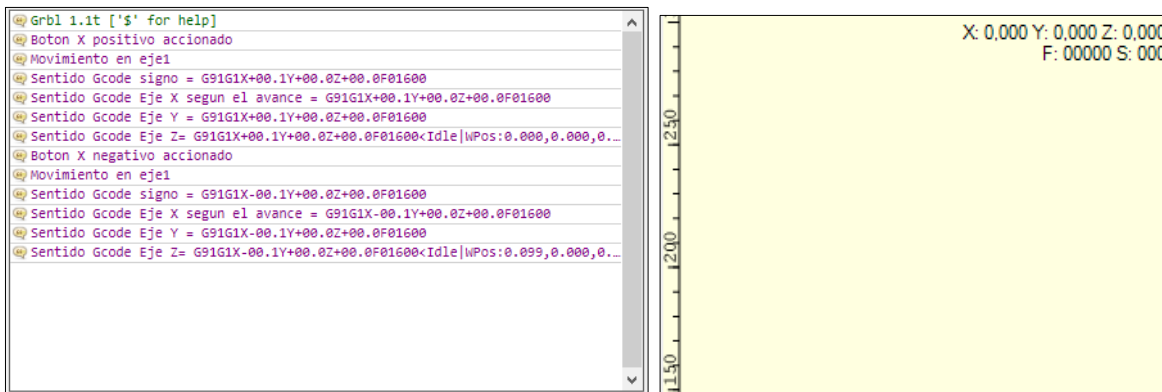
En la Figura 5-46.A) se muestra el mensaje desplegado al presionar el botón para realizar el movimiento en el eje X positivo donde primero se establece el signo de la instrucción de código G y en la instrucción “Sentido Gcode Eje X según el avance” es el que determina la instrucción de avance realizada. En la Figura 5-46.B) se observa la coordenada del sistema de ejes de coordenadas donde se realizó el movimiento de 0,099 mm (0,1 mm).

Luego, en la Figura 5-46.C) corresponde al movimiento en sentido X negativo realizado después del movimiento en sentido X positivo, en la primera línea “sentido Gcode signo” se muestra la línea de comando del código G donde se modifica el signo para realizar el movimiento negativo y en la siguiente línea “Sentido Gcode Eje X según el avance” se establece la línea definitiva ejecutada para realizar el movimiento. Por esta razón, en la Figura 5-46.B) se observa como luego de avanzar 0,1 mm en sentido positivo, al presionar el botón el eje X retrocede 0,1 mm.



A)

B)



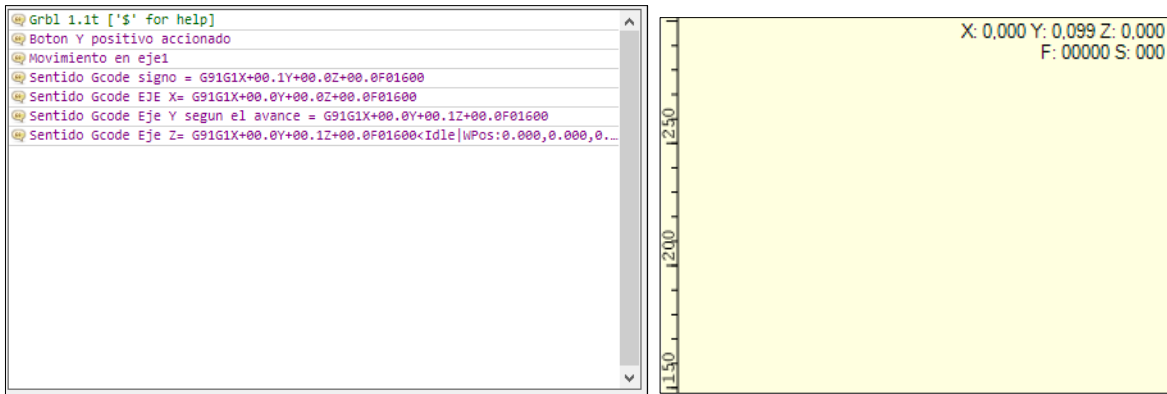
C)

D)

Figura 5-46. Botón con circuito antirrebotes movimiento X positivo y negativo. A) Mensaje desplegado con X positivo. B) Coordenada reportada al presionar X positivo. C) Mensaje desplegado con X negativo. D) Coordenada reportada al regresar al presionar X negativo. Fuente: Elaboración propia

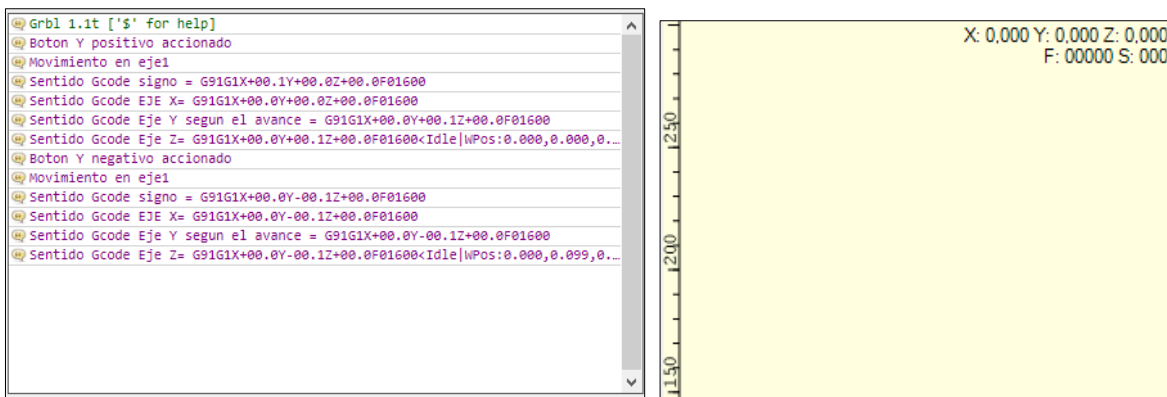
Al igual que en el eje X, se realiza la prueba con los botones pulsadores conectados al circuito antirrebotes del eje Y positivo y negativo, prueba que se muestra en la Figura 5-47. En la Figura 5-47.A) se determina el sentido positivo en el eje Y y posteriormente en el mensaje “sentido Gcode Eje Y según el avance” se determina la instrucción a ejecutar para realizar el movimiento en el eje Y, donde todos los ejes poseen un valor de movimiento en 0 y únicamente el eje Y seleccionado con el valor del avance. Por lo tanto, en la Figura 5-47.B) se observa como los ejes de coordenadas presentan un movimiento únicamente en el eje E igual a 0,099 mm (0,1 mm).

En el caso de presionar el pulsador para realizar un movimiento en sentido Y negativo, el resultado se muestra en la Figura 5-47.C) como en la línea del mensaje “sentido Gcode Eje Y según avance” la instrucción presenta únicamente un valor de avance en el eje Y con un signo negativo (-), obtenido en la Figura 5-47.D) la coordenada en $Y = 0,00$ mm.



A)

B)



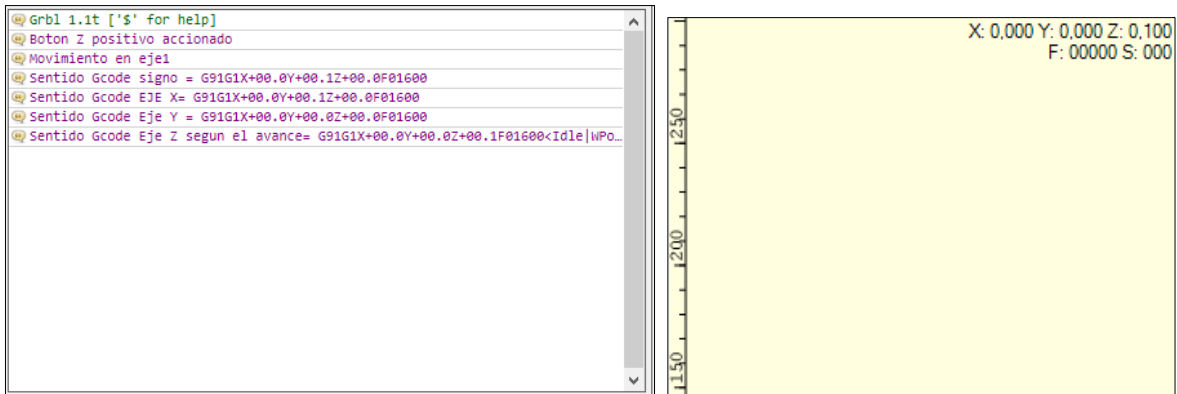
C)

D)

Figura 5-47. Botón con circuito antirrebotes movimiento Y positivo y negativo. A) Mensaje desplegado con Y positivo. B) Coordenada reportada al presionar Y positivo. C) Mensaje desplegado con Y negativo. D) Coordenada reportada al regresar al presionar Y negativo. Fuente: Elaboración propia

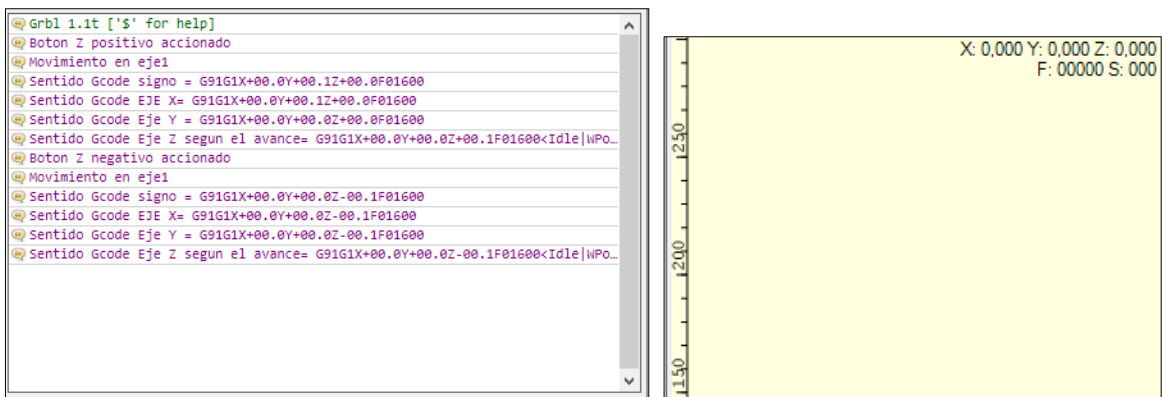
La prueba realizada a los botones pulsadores del eje Z en sentido positivo y negativo conectados con el circuito antirrebotes corresponde a la mostrada en la Figura 5-48. Al igual que los ejes anteriores se realiza el movimiento en sentido Z positivo al presionar el botón Z+ definiendo la instrucción del código G para realizar el movimiento únicamente en el eje Z, como se muestra en Figura 5-48.A). y Figura 5-48.D).

En el momento que se presionó el botón para el eje Z negativo, la instrucción cambia el signo como se muestra en la Figura 5-48.C) y ejecuta el retroceso del eje, obteniendo el resultado de la Figura 5-48.D)



A)

B)



C)

D)

Figura 5-48. Botón con circuito antirrebotes movimiento Z positivo y negativo. A) Mensaje desplegado con Z positivo. B) Coordenada reportada al presionar Z positivo. C) Mensaje desplegado con Z negativo. D) Coordenada reportada al regresar al presionar Z negativo. Fuente: Elaboración propia

La prueba realizada al botón para realizar el cambio en la cantidad de avance corresponde al mostrado en la Figura 5-49, en primer lugar, en la Figura 5-49.A) se muestra el primer cambio de avance que corresponde al cambio de 0,1 mm a 1,0 mm, posteriormente en la Figura 5-49.B) el siguiente cambio de avance corresponde al paso de 1,0 mm a 10,0 mm y por último es el cambio de 10,0 mm a 0,1 mm.

```
Grbl 1.1t ['$' for help]
Cambio de avance = 1
Avance = 0000001<Idle|WPos:0.000,0.000,0.000,0.000,0.000|FS:0,0>
```

A)

```
Grbl 1.1t ['$' for help]
Cambio de avance = 1
Avance = 0000001<Idle|WPos:0.000,0.000,0.000,0.000,0.000|FS:0,0>
Cambio de avance = 1
Avance = 0000010<Idle|WPos:0.000,0.000,0.000,0.000,0.000|FS:0,0|WCO:0.000,...
```

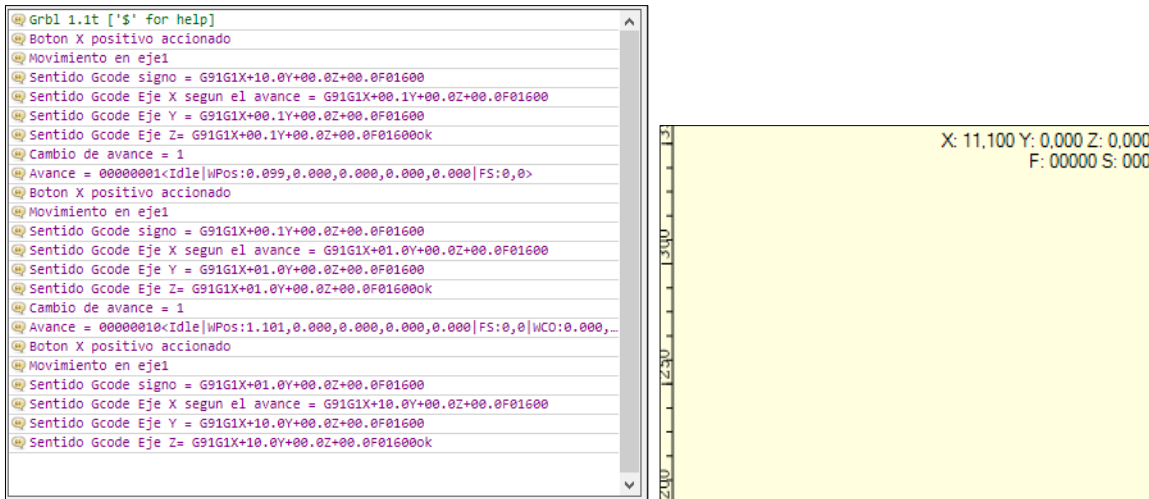
B)

```
Grbl 1.1t ['$' for help]
Cambio de avance = 1
Avance = 0000001<Idle|WPos:0.000,0.000,0.000,0.000,0.000|FS:0,0>
Cambio de avance = 1
Avance = 0000010<Idle|WPos:0.000,0.000,0.000,0.000,0.000|FS:0,0|WCO:0.000, ...
Cambio de avance = 1
Avance = 0<Idle|WPos:0.000,0.000,0.000,0.000,0.000|FS:0,0>
```

C)

Figura 5-49. Prueba de cambio de avance A) Cambio de avance 1 (1,0 mm.) B) Cambio de avance 2 (10,0 mm). C) Cambio de avance 3 (0,1 mm). Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los cambios de avance realizados en la Figura 5-49 se realizó el movimiento del eje X en sentido positivo obteniendo el resultado de la Figura 5-50. En la Figura 5-50.A) se muestran los tres movimientos realizados y como en las líneas del mensaje “Sentido Gcode X según el avance” la distancia del movimiento fue modificándose en la instrucción del código G, iniciando en 0,1 mm, luego 1,0 mm y por último 10,0. Al realizarse los tres movimientos se obtuvo la coordenada que se muestra en la Figura 5-50.B) de X = 11,1 mm que corresponde a la suma de los tres movimientos.



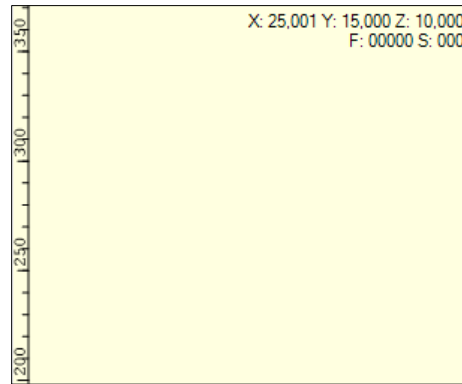
A)

B)

Figura 5-50. Combinando el cambio de avance con el movimiento del eje X.

Fuente: Elaboración propia

La comprobación al presionar el botón de colocar un nuevo origen en los ejes X y Y únicamente con el circuito antirrebotes se muestra en la Figura 5-51. En la Figura 5-51.A) se observa el valor en el eje de coordenadas inicial en X = 25 mm, Y = 15 mm y Z = 10 mm, luego en la Figura 5-51.B) se muestra el mensaje al presionar el botón donde “WPos” corresponde a la posición en el plano de trabajo nuevo y por último, la Figura 5-51.C) se observa dos sistemas de coordenadas uno con la posición absoluta que es igual a la inicial y el segundo con el nuevo origen definido, destacar que únicamente se desplazó al valor de cero los ejes X y Y, el eje Z se mantiene en el valor definido en un inicio.



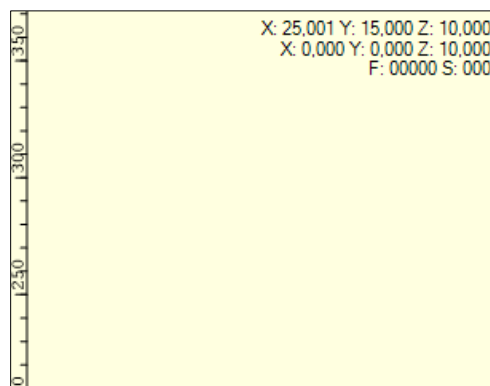
A)

```

Grbl 1.1t ['$' for help]
Nuevo origen XY = 0 <Idle|WPos:0.000,0.000,10.000,0.000,0.000|FS:0,0>
Colocado XY = 0 1<Idle|WPos:0.000,0.000,10.000,0.000,0.000|FS:0,0|WCO:25.001,15.000,0.000,15.000,0.000>

```

B)

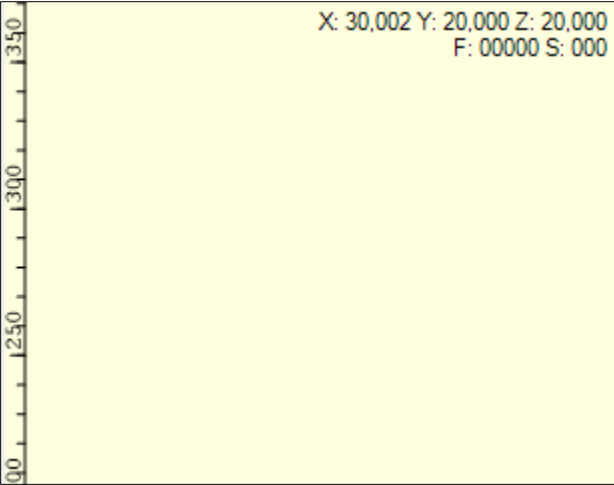


C)

Figura 5-51. Resultado de prueba de botón para un nuevo origen en X y Y. A) Coordenadas inicial para la prueba de nuevo origen en X y Y. B) Mensaje desplegado del cambio de coordenadas en X y Y. C) Muestra del cambio en las coordenadas en X y Y. Fuente: Elaboración propia

Al realizar la prueba del botón pulsador de colocar un nuevo origen en el eje Z conectado al circuito antirrebotes con una condición inicial donde las coordenadas de los ejes son $X = 30 \text{ mm}$, $Y = 20 \text{ mm}$ y $Z = 20 \text{ mm}$ como se muestra en la Figura 5-52.A) se obtuvo el mensaje que se muestra en la Figura 5-52.B) donde “WCO”

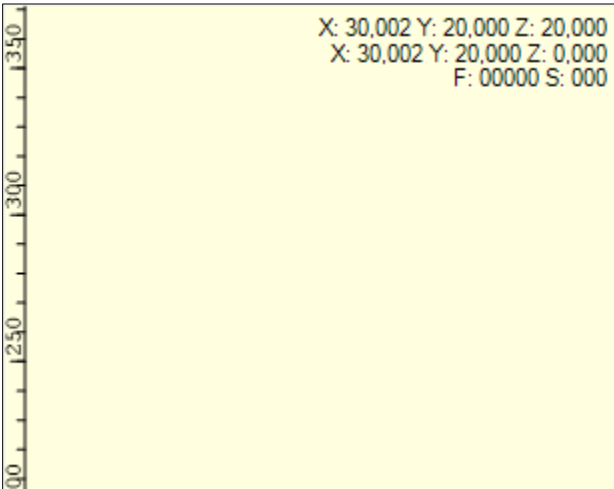
que corresponde a la posición de trabajo, el tercer valor que pertenece al eje Z posee un valor de 0 mm, por lo tanto en la Figura 5-52.C) se desplegó un nuevo valor de coordenadas, que corresponde a “WCO” con Z = 0, es decir se definió la posición actual como el nuevo origen para el eje Z.



A)

```
Grbl 1.1t ['$' for help]
Nuevo Origen Z = 0 <Idle|WPos:30.002,20.000,0.000,20.000,0.000|FS:0,0>
Colocado Z = 01<Idle|WPos:30.002,20.000,0.000,20.000,0.000|FS:0,0|WCO:0.000,0.000,20.000,0.000,0.000>
```

B)



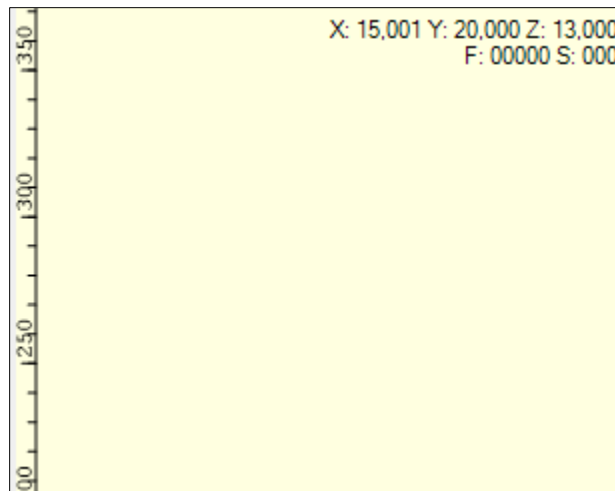
C)

Figura 5-52. Resultado de prueba de botón para un nuevo origen en Z. A) Coordenadas inicial para la prueba de nuevo origen en Z. B) Mensaje desplegado del cambio de coordenadas en Z. C) Muestra del cambio en las coordenadas en Z.

Fuente: Elaboración propia

Con una coordenada igual a la mostrada en la Figura 5-53.A) se realizó la prueba con el botón pulsador para realizar el movimiento de los ejes hasta el origen en los ejes X y Y conectado al circuito antirrebotes. En la Figura 5-53.B) se muestra como al presionar el botón, el sistema despliega el mensaje de que se presionó el botón de ir al origen y entra en un estado de "Run" (corriendo) aludiendo que el sistema está moviendo los ejes a la posición deseada, que en este caso corresponde a la posición 0 en el eje X y Y.

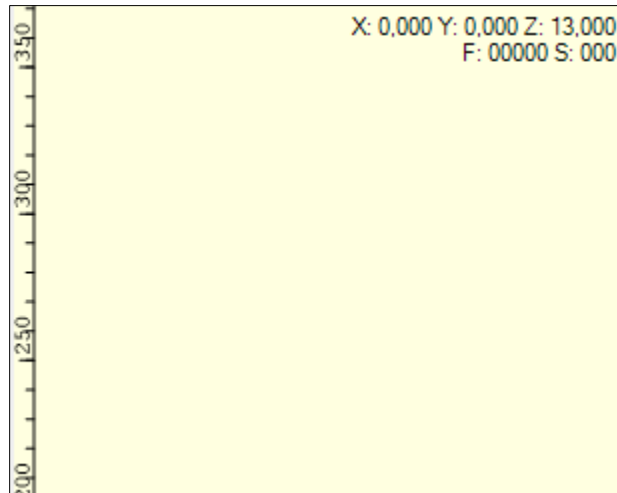
En la Figura 5-53.C) el programa muestra que las coordenadas pasaron de $X = 15 \text{ mm}$ a $X = 0$, $Y = 20$ a $Y = 0$ y $Z = 13$ se mantuvo en $Z = 13$, tal y como se esperaba.



A)

```
Grbl 1.1t ['$' for help]
Ir al origen = 10k
Ir al origen XY = <Run|WPos:14.757,19.676,13.000,19.676,0.000|FS:1000,0|WCO:0.000,0.000,0.000,0.000,0.0...
```

B)

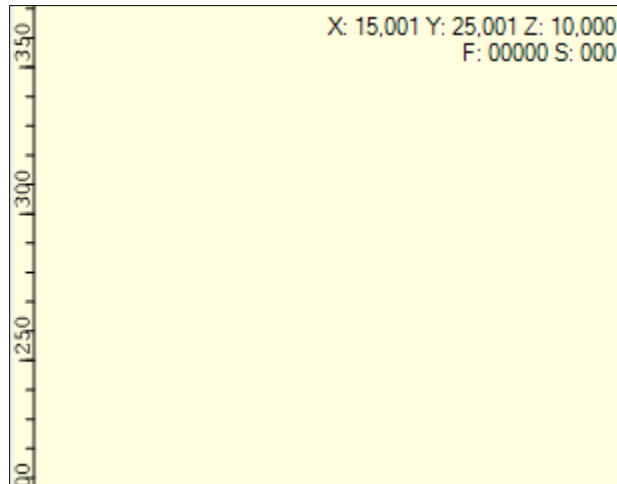


C)

Figura 5-53. Resultados de prueba de dirigirse al origen en X y Y. A) Coordenadas inicial para la prueba de movimiento al origen en X y Y. B) Mensaje desplegado del movimiento al origen en X y Y C) Muestra la posición en el origen en X y Y.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba del botón para llevar el eje Z al origen conectado al circuito antirrebotes se observan en la Figura 5-54. En la Figura 5-54.A) se establecen las coordenadas iniciales para la prueba, siendo $X = 15$ mm, $Y = 25$ mm y $Z = 10$ mm. Al presionar el botón se desplegó el mensaje que se muestra en la Figura 5-54.B) donde se establece que la tarea a realizar es la de ir al origen en el eje Z y el estado de la máquina encuentra en “Run” (corriendo) por lo que el eje inicia el traslado a $Z = 0$ mm, al moverse el eje Z a su origen la coordenada Z descende su valor hasta llegar al origen, este resultado se puede comprobar en la Figura 5-54.C) donde la coordenada que cambio fue únicamente la Z de $Z = 10$ mm a $Z = 0$ mm.



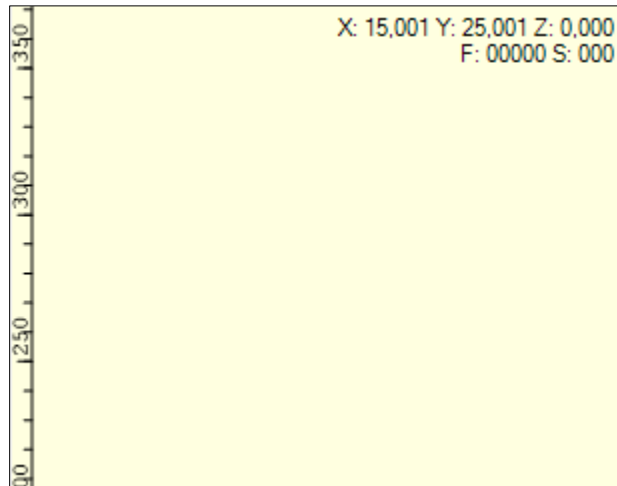
A)

```

Grbl 1.1t ['$' for help]
Ir al origen = 2
Ir al origen Z <Run|WPos:15.001,25.001,9.968,25.001,0.000|FS:25,0|Ov:100,100,100>

```

B)



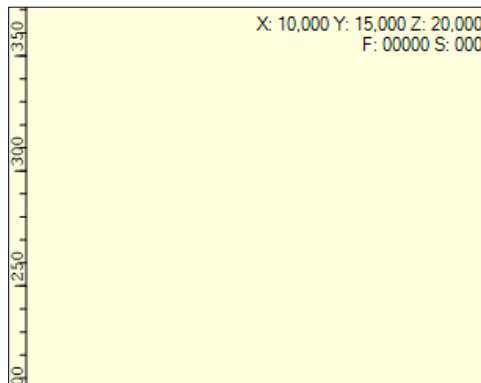
C)

Figura 5-54. Resultados de prueba de dirigirse al origen en Z. A) Coordenadas inicial para la prueba de movimiento al origen en Z. B) Mensaje desplegado del movimiento al origen en Z C) Muestra la posición en el origen en Z. Fuente:

Elaboración propia

El ultimo botón pulsador por probar corresponde al de realizar el desplazamiento de los tres ejes de coordenadas hasta el origen, la prueba inicia moviendo los tres ejes de coordenadas a una posición cualquiera, la posición elegida corresponde a $X = 10 \text{ mm}$, $Y = 15 \text{ mm}$ y $Z = 20$, tal y como se muestra en la Figura 5-55.A).

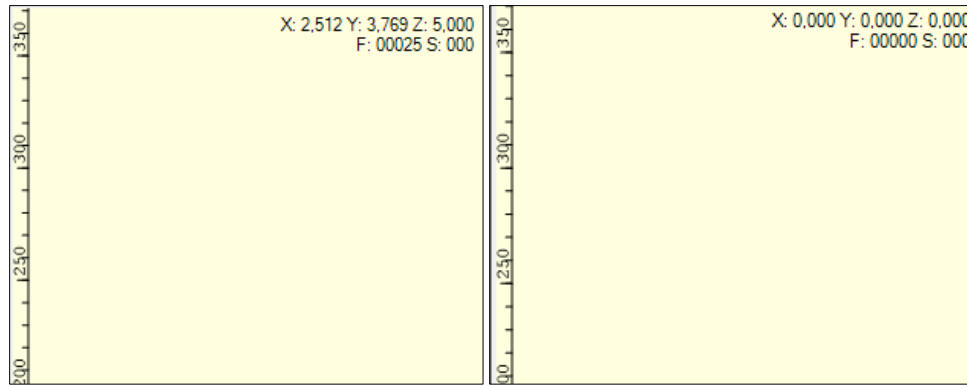
Al presionar el pulsador que se encuentra conectado al circuito antirrebotes, el sistema despliega los mensajes que se muestran en la pantalla Figura 5-55.B), donde se indica que el sistema se encuentra en estado de “Run” (corriendo) por lo que se inicia el traslado de los tres ejes al origen. En la Figura 5-55.C) se observa que la coordenada del eje Z ha disminuido y al alcanzar el valor de $Z = 5 \text{ mm}$ el sistema detuvo el movimiento e inicio a trasladar los ejes X y Y al origen, al concluir con el movimiento de los ejes X y Y, se finaliza con el último movimiento en Z de alcanzar el valor de 0 mm , obteniendo al final el resultado que se muestra en la Figura 5-55.D) que corresponde a los tres ejes X, Y y Z en un valor igual a 0 mm , es decir, se encuentran en el origen.



A)

```
Grbl 1.1t ['$' for help]
Ir al origen = 3
Ir al origen XYZ = <Run|WPos:10.000,15.000,19.926,15.000,0.000|FS:25,0>
```

B)



C)

D)

Figura 5-55. Prueba de dirigirse al origen en X, Y y Z. A) Coordenadas inicial B) Mensaje del movimiento al origen en X, Y y Z C) Muestra del regreso de Z, X y Y al origen, D) Posición final de los ejes X, Y y Z. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Cumplimiento de la norma IEC 60825

En el capítulo 2 sección 2.7 se muestra un resumen de la norma IEC 60825 que corresponde a la norma internacional sobre la seguridad que debe tener los productos láser. A lo largo del proyecto, se ha hecho alusión a los diferentes aspectos en donde se ha considerado la norma y se han agregado elementos para llegar a cumplirla para un láser clasificado como clase 4. En la siguiente tabla se realiza un resumen de los aspectos que la norma establece y como fueron incorporados en el proyecto:

Tabla 5-5. Resumen de aspectos incorporados al proyecto a partir de la norma IEC 60825

Aspecto que menciona la norma	Implementación en el proyecto
Carcasa protectora	Se implementó una carcasa protectora que encierra toda el área de trabajo. Este posee una pared interna que mantiene separada y cerrada los elementos de control y alimentación con el área de trabajo.
Cierre remoto	Interruptores tipo finales de carrera para comprobar el estado de la puerta, conectados al pin A12 del controlador ya que en este pin se ejecuta el protocolo de seguridad para las puertas de acceso. Al encontrarse en estado de puerta de acceso abierta se pausa el proceso de grabado y se imposibilita el encendido del láser.

Control por llave	Se incorporó un switch para la alimentación en donde solo puede ser accionado con una llave, esta puede ser extraída por lo que solo el operario que la posee puede encender la máquina.
Controles	Se le realizó la incorporación de una botonera en el lateral izquierdo de la carcasa que permite una operación remota, es decir, permite ajustar los ejes del láser sin necesidad que el usuario deba interactuar con los elementos que componen los ejes X, Y y Z de la máquina.
Para de haz	Por seguridad se agregaron dos switches que permiten controlar la alimentación principal uno con llave y otro colocado en serie tipo Rocker para mayor control. Además, se agregaron dos switches independientes, donde uno controla el suministro eléctrico a la placa de control y el otro al láser. También, un botón tipo hongo como del paro en caso de emergencia.
Visualización	Las puertas son traslucidas para poder visualizar la operación cuando se requiere. Para obtener seguridad ocular estas puertas presentan un filtro del color, saturación y grosor tal y como lo solicita la norma UNE-EN 207:2010
Advertencias	Como parte de la alerta de riesgo se agregaron las etiquetas de advertencia al usuario. Estas fueron agregadas tanto en el área frontal, la pared del fondo interna, pared externa superior y pared trasera. Las etiquetas incluidas son de tipo: advertencia, explicativa e informativa.

5.5 Limitaciones

Durante la realización del proyecto se presentaron situaciones y condiciones que fueron limitantes a la hora del desarrollo proyecto principalmente en el proceso de la construcción del prototipo, eso fue debido a la pandemia mundial por el COVID-19 y las medidas de restricción impuestas por el Ministerio de Salud de Costa Rica. Esta pandemia dificultó la compra y envío de materiales, consultas presenciales fueron únicamente virtuales, movilidad por restricciones, cierre de tiendas y universidad y el riesgo de contagio.

Además, la empresa a ser una microempresa los equipos y materiales eran prácticamente nulos y en la zona de Turrialba donde se desarrolló el proyecto las tiendas más cercanas para adquirir componentes se encuentran en la zona de Cartago y con el mal servicio de buses debido a la pandemia, por lo tanto con dificultad de movilización y las compras, se debían realizar en momentos estratégicos y con la posibilidad de que faltara algún componente debido a escasos de inventario que manejan las tiendas nacionales.

Sin embargo, a pesar de las limitaciones presentes fue posible la realización del prototipo y evacuar dudas por plataformas como Microsoft Teams y Zoom, a pesar de las limitaciones que se tuvieron que solucionar a lo largo del proceso.

5.6 Análisis Económico

Como parte del análisis económico fue el tomar en cuenta el cálculo de indicadores que permiten evaluar el costo y la inversión en la máquina diseñada, con el fin de realizar un análisis de la inversión. Estos indicadores financieros corresponden a los siguiente:

- Valor Actual Neto (VAN):

El VAN corresponde en encontrar el valor que diferencia el valor actualizado en el presente de los flujos de entrada generados con respecto al valor actualizado en el presente de la inversión de efectivo realizada por la empresa para la adquisición de la máquina. [26]

- Tasa Interna de Rendimiento (TIR):

Corresponde al cálculo de la tasa de actualización (i) que permite que los flujos que ingresan a la empresa gracias al proyecto sean iguales al valor de la inversión realizada por la empresa para el financiamiento de la máquina, es decir corresponde al valor de la tasa de actualización que ocasiona que el VAN sea cero, por lo tanto, se espera que el valor (i) seleccionado en el VAN sea menor que el valor del TIR. [26]

- Retorno sobre la inversión (ROI)

El ROI es el valor que mide cuanta relación existe entre la ganancia que genera el proyecto en un tiempo establecido con respecto a la inversión que ha realizado la empresa. [27]

En el caso del VAN y el ROI para poder aceptar la inversión deben ser valores mayores a cero, ya que determina una inversión positiva, es decir generara beneficios económicos. [26], [27]

A continuación, se muestra el detalle de los costos que fueron parte del desarrollo y realización del proyecto. Al momento de la realización de las compras el Banco Central de Costa Rica estableció que el tipo de cambio es de \$1 es igual a ₡622,37.

Tabla 5-6. Costo de los elementos eléctricos

Elemento	Cantidad	Precio (\$)	Precio total (\$)
Fuente	1	10,9	10,9
Relé	1	0,3	0,3
Rocker switch	3	0,4	1,2
Switch de llave	1	0,98	0,98
Botón de emergencia	1	1,51	1,51
Botones pulsadores	12	0,185	2,22
Arduino	1	8,61	8,61
Ramps	1	3	3
Ventilador	1	2,69	2,69
Drivers	4	0,89	3,56
Motor 42HD4027-01-A	2	8,52	17,04
Motor OK42STH22	2	11,99	23,98
Láser	1	59	59
Resistencias y capacitores	1	1,5	1,5
Cable	1	10	10

En la Tabla 5-6 se mostró el valor de los componentes involucrados en el proyecto en el aspecto eléctrico, con un total de \$146,49 que con el tipo de cambio del dólar corresponde a ₡ 91 116,78.

Tabla 5-7. Costo de los elementos mecánicos.

Elemento	Cantidad	Precio (\$)	Precio total (\$)
Tornillería y tuercas	1	5	5
Agarraderas	2	0,87	1,74
Bisagras	4	1,04	4,16
Cerraduras	4	1,48	5,92
Vigas acero inoxidable 10 mm	6	12	72
Viga aluminio 8 mm	2	1	2
Varillas roscadas T8 400 mm	2	3,91	7,82
Varillas roscadas T8 600 mm	1	5,1	5,1
Varilla roscada M8x1.5	1	1	1
Rodamientos 10 mm LM10UU	6	1,06	6,36
Rodamientos 8 mm LMUU	2	0,65	1,3
Rodamientos radiales	4	0,345	1,38
Acoples	4	0,78	3,12

En la Tabla 5-7 se enlista los componentes mecánicos que son parte del proyecto realizado a lo largo de este informe, estos al ser sumados presentan un monto total de \$116,9 que a partir del tipo de cambio el valor en colones es de ₡72 711,8.

Para la estructura de los ejes, es necesario el filamento ASA que 1 kg tiene un precio de \$30,5, donde la manufactura de las piezas tiene un total de \$19 aproximadamente, por lo tanto, se requiere una inversión en este apartado de alrededor de los \$49,5 (₡30 789).

En la siguiente Tabla 5-8 se muestra el costo de los elementos que son parte de la carcasa que encierra la máquina de grabado láser diseñada en este proyecto. En esta tabla se muestra que se tiene un costo total por todos los elementos igual a \$147 al ser sumados, este valor en colones es igual a ₡91 434.

Tabla 5-8. Costo de las partes de la carcasa.

Elemento	Cantidad	Precio (\$)	Precio total (\$)
Patas de madera	2	15	30
Paredes de carcasa	1	50	50
Tapas de carcasa	1	30	30
Base de carcasa	1	27	27
Corte láser	1	10	10

Los programas que a nivel de mercado no son gratuitos son los siguientes:

- Autodesk Inventor, programa dedicado al dibujo y modelado de piezas en 3D tiene un costo de \$275 al mes, que para los 4 meses de proyecto corresponde a \$1 100, que en colones con el tipo de cambio mencionado anteriormente es de ₡68 4200.
- El programa recomendado para el manejo de la máquina llamado LightBurn posee una licencia de pago único con un costo de \$60, es decir que equivale a ₡37 320.

Según el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social del gobierno de Costa Rica, bajo el decreto número 42748-MTSS, se establece que para una persona que se encuentre en una ocupación con el grado de bachiller universitario le corresponde como salario mensual ₡568 819.86 de tiempo completo. El proyecto se programó para 16 semanas, abarcando parte del mes de febrero a parte del mes de junio del año 2021, con una jornada de medio tiempo; por lo tanto, el salario para el diseñador correspondió un valor de ₡284 409,93 que por los 4 meses laborados significo un monto total de ₡1 137 639,72.

El costo de ensamble está calculado a una jornada realizada por un técnico de educación superior, que según el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social le corresponde un salario mensual de ₡ 464 335,93 que equivale a ₡23 216,80 por jornada completa de trabajo.

En resumen, se tiene la siguiente tabla que recopila los costos:

Tabla 5-9. Costos totales.

Aspecto	Costo (€)
Materiales eléctricos	91 116,78
Materiales Mecánicos	72 711,80
Materiales de la carcasa	91 434
Impresión 3D	30 789
Licencia del programa de dibujo (Inventor)	684 200
Licencia del programa de control (LightBurn)	37 320
Diseñador	1 137 639,72
Costo de ensamble	23 216
Total	2 168 427,30

Se consultó con el dueño de la empresa Ing. Arturo Gamboa, sobre el tiempo de trabajo y el ingreso a partir del servicio de grabado, indicando que la empresa y el mercado se cobra alrededor de € 1 por minuto de grabado de ganancia, en donde Hartmade® se dedica alrededor de 7 horas efectivas al día al grabado de los productos, por lo que Hartmade® genera por el servicio independiente de grabado alrededor de €120 960 al año.

Con un flujo de ingresos anual de €120 960 que puede proporcionar la máquina por el tiempo de grabado, con un costo de inversión de €2 168 427,30 por parte de Hartmade® que corresponden a los costos totales del proyecto y con una tasa de actualización de 5%, se obtiene el VAN, TIR y el ROI proyectado a 5 años, cuyo resultado se muestra en la siguiente Tabla 5-10.

Tabla 5-10. Indicadores financieros con todos los costos.

Indicador financiero	Valor obtenido
VAN	-1 644 733, 80
TIR	-32 %
ROI	-72%

De la Tabla 5-10 y lo mencionado anteriormente, se muestra que tanto el VAN, TIR y ROI advierte que realizar esta inversión a 5 años no es factible, ya que el VAN y el ROI son negativos y el TIR no da un porcentaje mayor a la tasa de actualización, esto se debe al bajo ingreso que genera la máquina al realizar los

trabajos de grabado frente al elevado monto de inversión por cubrir, por lo que con estos valores se considera un monto no rentable para la empresa.

En el Apéndice C, se puede consultar el resultado de los indicadores financieros del caso donde la empresa no toma en cuenta costos de diseño (por acuerdo con diseñador) y de software que se encuentran disponible. En este caso se obtuvo que el costo de implementación ronda los \$346 587,58 aproximadamente.

Realizando una comparación de aspectos importantes con otras máquinas con un área de trabajo similar y potencia de láser cercana que se encuentran disponibles en el mercado, fueron encontradas dos opciones que se muestran a continuación con sus determinadas características:

1. Neje Master 2S



Figura 5-56. Neje Master 2S. Obtenido de Amazon.com

Tabla 5-11. Características de la Neje Master 2S.

Característica	Valor
Precio	\$573.86 (\$356 940,92)
Tipo de láser	Diodo
Potencia del láser	5,5 W
Tiempo útil del láser	20 000 h
Área de trabajo	46 x 81 cm
Velocidad	1000 mm/s
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> - Panel pequeño en la punta del láser dando un 90% de bloqueo de la luz. - Giroscopio para detectar un toque accidental de la máquina que detiene el funcionamiento. - Anteojos de seguridad para láser.
Servicio al cliente y repuestos	Equipo de servicio al cliente.

	<p>Con servicio de repuestos para piezas vulnerables en todo el mundo. Garantía de 2 años.</p>
--	--

2. Ortur Laser Master

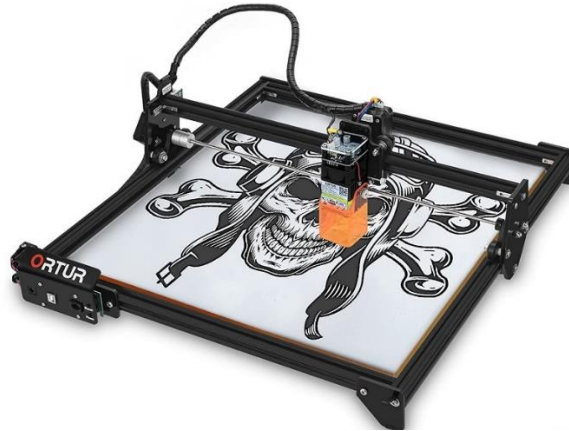


Figura 5-57. Ortur Laser Master. Obtenido de amazon.com

Tabla 5-12. Características de la Ortur Laser Master

Característica	Valor
Precio	\$512,36 (₪318687.92)
Tipo de láser	Diodo
Potencia del láser	5 W
Tiempo útil del láser	8000 h
Área de trabajo	50 x 54 cm
Velocidad	1000 mm/s
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor G que detecta un movimiento externo por lo que detiene el haz del láser. - Si el motor se detiene o se pierde comunicación con PC se corta el haz del láser. - Panel pequeño en la punta del láser para protección ocular. - Anteojos de seguridad para láser.
Servicio al cliente y repuestos	Garantía de un año y servicio al cliente

Las dos máquinas mostradas anteriormente presentan un valor monetario similar a la realizada en el proyecto, ya que en el caso de la Neje Master 2S el precio es ₡10 353,34 mayor con respecto a los ₡346 587,58 para la realizada en este proyecto y la Ortur Laser Master el precio es ₡27 899.66 menor a la del proyecto. A pesar de que el precio sea cercano, estas presentan diferencias importantes, por ejemplo:

- El área de trabajo de la realizada para el proyecto es de 50 x 35 cm, dimensiones definidas a petición del cliente teniendo en cuenta las dimensiones de una mesa tipo mostrador, en el caso de la Neje Master 2S y la Ortur Laser Master el área de trabajo es mayor el cual sería beneficioso para la colocación de piezas de mayor medida, pero sería necesario el recurrir a una mesa distinta o adaptación para lograr ser colocadas.
- La máquina realizada en el proyecto posee la capacidad de trabajar con piezas con una altura máxima de 6 cm, gracias que es capaz de variar la altura en Z para mantener la distancia focal con el láser, sin necesidad de que el usuario manipule la parte interna de la máquina. En las máquinas anteriores el eje Z se encuentra fijo, estas deben estar sobre el material o pedazos de este en sus esquinas para poder mantener la distancia focal del láser, ocasionando dificultades de operación o exposición a accidentes por desequilibrio al subir la máquina, afectando el tema de la seguridad.
- En estas máquinas mostradas la protección visual la brindan con lentes de seguridad y una barrera alrededor del haz de luz, barrera que no garantiza cubrir completamente al láser, además que son abiertas y no presentan barreras de protección o carcasa. En el proyecto se brinda toda una carcasa cerrada con tapas para visualizar el proceso con filtro para los ojos según la longitud de onda, con el fin de prevenir el caso en que el usuario no utilice los lentes de protección y necesite supervisar el proceso de grabado de forma segura.
- A diferencia de las máquinas mostradas anteriormente, la máquina del proyecto presenta elementos independientes de control de la energía y paro de emergencia para que en caso de emergencia u operación se pueda

realizar la desactivación de sistemas, además de un switch de seguridad por llave, para ser activado únicamente por operador encargado de esta máquina.

- Según la norma IEC 60825 la señalización e indicaciones de advertencia de que corresponde una máquina láser se deben colocar en la máquina, en estas máquinas encontradas en el mercado, lo advierten mediante texto en la página de venta únicamente y sobre el espacio de trabajo, por lo que lo dejan como tarea del usuario. En el caso de la máquina del proyecto, se realizaron y se indicaron dónde deben ir colocadas en la máquina para advertir al usuario operador y no son opcionales ya están definidas en el diseño.

Importante señalar, que la máquina realizada cumple con las necesidades de la empresa HARTMADE® de tener una máquina que sea capaz de ser transportada de forma fácil y segura, con un área de trabajo amplio (50 x 35 cm) y poder realizar grabado de forma exitosa, ya que les permite realizar demostraciones en ferias de negocios, evento que como pyme son de importancia para llamar la atención de los clientes y posibles socios claves, además, el poder colocar la máquina en una tienda física para brindar una atención y realización final del producto en el momento de forma personalizada donde se vuelve un atractivo la demostración segura del grabado al cliente, como también, la posibilidad ampliar su equipo y así aumentar la capacidad de manufactura y reducir el paro de producción al realizar mantenimientos a la única máquina láser que poseen.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

- Se finalizó el diseño de la estructura de diseño obteniendo un área de trabajo para el grabado igual a 50 cm en el eje X y 35 cm en el eje Y, donde en el caso del eje X se mantuvo en el valor mínimo establecido y en el caso del eje Y se obtuvo un aumento del 40% del valor mínimo establecido de forma satisfactoria.
- Posterior a una comprobación de los resultados obtenidos en la medición del movimiento del sistema electromecánico con un intervalo de confianza al 98%, se determina que para el eje X se tiene un rango de valores de $\pm 0,18$ mm, para el caso del eje Y un valor de $\pm 0,15$ mm y para el caso de los movimientos diagonales se tiene un valor de $\pm 0,23$ mm, siendo el 0,23 mm un 77% menor al 1 mm máximo establecido.
- Se obtuvo un funcionamiento del 100% de la botonera y el código implementado, permitiendo realizar un control manual del sistema sin necesidad de recurrir al software de control por computadora.
- En el grabado de una imagen patrón con respecto al grabado realizado por la máquina RedSail se obtuvo un porcentaje de similitud igual 75,7%, donde aspectos de luz y manchas del material pudo ocasionar el aumento del error, por lo que el valor se toma como aceptado.
- Tras las diferentes pruebas realizadas y la iteración con diferentes valores se logró establecer los siguientes parámetros para el cartón, MD, Madera y acrílico negro.

Tabla 6-1- Parámetros establecidos para el grabado.

Material	Velocidad	Potencia
Cartón	Letras pequeñas: 600 mm/min Letras grandes: 1100 mm/min Relleno: 1100 mm/min	Letras pequeñas: 5% Letras grandes: 12% Relleno: 6 %
MDF	Letras pequeñas: 700 mm/min Letras grandes: 1300 mm/min Relleno: 1300 mm/min	Letras pequeñas: 12% Letras grandes: 18% Relleno: 18%
Madera	Letras pequeñas: 700 mm/min Letras grandes: 1300 mm/min Relleno: 1300 mm/min	Letras pequeñas: 20% Letras grandes: 25% Relleno: 28%

Acrílico negro	Letras pequeñas: 700 mm/min Letras grandes: 1300 mm/min Relleno: 1300 mm/min	Letras pequeñas: 12% Letras grandes: 18% Relleno: 18%
-----------------------	--	---

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda fijar el lente del láser para evitar que se pueda desajustar de forma fácil y reducir la necesidad de que el usuario deba calibrar la distancia focal.
- Es importante que la estructura sea colocada en una mesa firme para evitar que se genere movimiento de la mesa durante la realización de alguna tarea.
- Se recomienda definir un perímetro para la láser de forma que los clientes a visitar no interactúen con él y llegue a ocurrir un accidente por la exposición al láser.
- Se recomienda lubricar las varillas redondas y las vigas del sistema con grasa a base de litio y obtener un movimiento suave.

7 Referencias bibliográficas

- [1] HARTMADE, «Hartmade Brochure».
- [2] HARTMADE, «HARTMADE principal website,» 28 Enero 2021. [En línea]. Available: <https://hartmade.principalwebsite.com/>.
- [3] A. Gamboa Solís, Interviewee, *Charla sobre detalle de la empresa y problema*. [Entrevista]. 2021.
- [4] D. Xu, «Laser Machine-X700,» 27 Enero 2021. [En línea]. Available: <http://www.redsailcnc.com/X700.html>.
- [5] Real Academia Española, «Láser,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/l%C3%A1ser>.
- [6] Hermes, «EL DIODO LASER; Ultima generacion en aplicaciones electronicas,» 7 Abril 2018. [En línea]. Available: <http://tecnologia.alemaniahoy.com/tecnologia/el-diodo-laser-ultima-generacion/>.
- [7] L. A. De La Cruz Reyes, «Diodo láser, Definición, características y usos,» [En línea]. Available: <https://ingenieriaelectronica.org/diodo-laser-definicion-caracteristicas-usos/>.
- [8] R. Concepción, «Tarjetas de Desarrollo (Episodio #8),» 19 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.rjconcepcion.com/podcast/tarjetas-de-desarrollo-episodio-8/>.
- [9] F. Conti, «Motores paso a paso.,» 2005. [En línea]. Available: https://books.google.es/books?id=6yiXDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
- [10] I. «DRV8825: el driver para motores paso a paso,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.hwlibre.com/drv8825/>.
- [11] V. García, «Motores PaP Unipolares,» 20 junio 2011. [En línea]. Available: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/motores-pap-unipolares>.
- [12] R. C. Hibbeler, *Mecánica de materiañes*, Octava ed., Mexico: Pearson Educación, 2011.
- [13] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecaánia de Shigley*, Novena ed., Mexico: McGraw-Hill, 2012.
- [14] gnea, «GRBL,» 22 Junui 2021. [En línea].
- [15] fra589, «grbl-Mega-5X,» 10 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://github.com/fra589/grbl-Mega-5X>.
- [16] International Standard, «IEC 60825-1,» Geneva, 2001.

- [17] K. T. Ulrich y S. D. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*, Quinta ed., Mexico: McGrawHill Education, 2013.
- [18] A. Locker, «Filamento PETG: todo sobre el filamento 3D,» 29 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://all3dp.com/es/1/filamento-petg-impresion-3d/>.
- [19] Jorge Lorenzo, «PLA vs ABS vs PETG: para que uso Yo cada uno **【COMPARATIVA】** ,» [En línea]. Available: <https://of3lia.com/pla-vs-abs-vs-petg-comparativa/>.
- [20] A. M, «El plástico de policarbonato en la impresión 3D,» 11 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-de-policarbonato-en-la-impresion-3d-110220202/>.
- [21] CSN EN , «EN207 Personal eye-protection equipment,» 2017.
- [22] M. Moya Navarro y N. Robles Obando, *PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA Un enfoque teórico práctico*, Segunda ed., Cartago: Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [23] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers y Y. Keying, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, Novena ed., Mexico: Pearson Education, 2012.
- [24] Minitab, «Soporte de Minitab 18. Pruebas de normalidad,» [En línea]. Available: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/test-for-normality/#perform-a-normality-test>.
- [25] MathWorks, «ssim,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/ssim.html>.
- [26] F. Jiménez Boulanger, C. L. Espinoza Gutiérrez y L. Fonseca Retana, *Ingeniería Económica*, Primera ed., Cartago: Tecnológica de Costa Rica, 2007.
- [27] Banco Finandina, «¿Cómo calcular el retorno de la inversión (ROI)?,» 18 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.bancofinandina.com/finanblog/noticias/2019/10/18/como-calcular-mejor-el-roi>.

A. Apéndice A. Diagrama de flujo

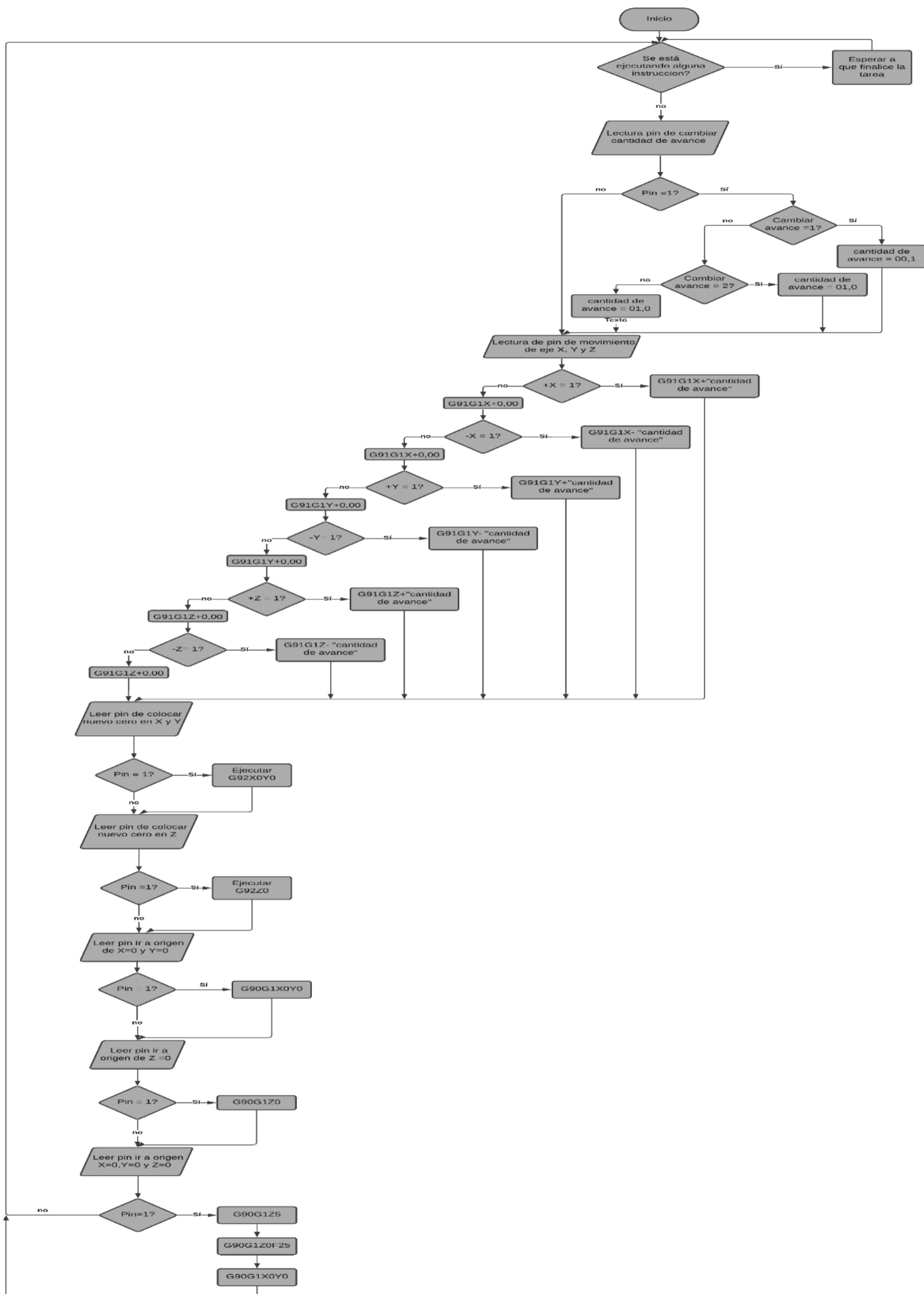


Figura A.1. Diagrama de flujo del código implementado

B. Apéndice B. Tablas de medición de desplazamiento.

Figura B-1. Prueba 1 de medición en X.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en X ($\pm 0,05$ mm)
1	0-100	0,00	100,15
2	100-200	15,22	100,13
3	200-300	30,43	99,65
4	300-400	45,65	99,77
5	400-300	60,87	99,91
6	300-200	76,09	100,07
7	200-100	91,30	100,29
8	100-0	106,52	99,83
9	0-100	121,74	100,10
10	100-200	136,96	99,90
11	200-300	152,17	99,69
12	300-400	167,39	100,24
13	400-300	182,61	100,22
14	300-200	197,83	100,33
15	200-100	213,04	100,30
16	100-0	228,26	100,14
17	0-100	243,48	100,27
18	100-200	258,70	100,16
19	200-300	273,91	100,28
20	300-400	289,13	100,17
21	400-300	304,35	100,01
22	300-200	319,57	99,61
23	200-100	334,78	99,78
24	100-0	350,00	99,69
	Promedio		100,03
	Desviación estándar		0,2343
	Varianza muestral		0,0549

Figura B-2. Prueba 2 de medición en X.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en X ($\pm 0,05$ mm)
1	0-100	0,00	99,78
2	100-200	15,22	100,10
3	200-300	30,43	99,66
4	300-400	45,65	99,69
5	400-300	60,87	100,21

6	300-200	76,09	100,22
7	200-100	91,30	100,26
8	100-0	106,52	100,12
9	0-100	121,74	99,96
10	100-200	136,96	99,81
11	200-300	152,17	99,98
12	300-400	167,39	99,63
13	400-300	182,61	100,18
14	300-200	197,83	99,89
15	200-100	213,04	99,79
16	100-0	228,26	99,62
17	0-100	243,48	100,10
18	100-200	258,70	100,30
19	200-300	273,91	99,91
20	300-400	289,13	100,18
21	400-300	304,35	100,14
22	300-200	319,57	99,60
23	200-100	334,78	99,75
24	100-0	350,00	100,18
	Promedio		99,96
	Desviación estándar		0,231870603
	Varianza muestral		0,053763977

Figura B-3. Prueba 3 de medición en X.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en X ($\pm 0,04$ mm)
1	0-100	0,00	100,25
2	100-200	15,22	100,08
3	200-300	30,43	100,25
4	300-400	45,65	100,08
5	400-300	60,87	99,80
6	300-200	76,09	100,02
7	200-100	91,30	100,11
8	100-0	106,52	100,11
9	0-100	121,74	100,25
10	100-200	136,96	99,86
11	200-300	152,17	100,05
12	300-400	167,39	99,63
13	400-300	182,61	100,15
14	300-200	197,83	100,06
15	200-100	213,04	99,93

16	100-0	228,26	100,01
17	0-100	243,48	99,60
18	100-200	258,70	100,30
19	200-300	273,91	99,60
20	300-400	289,13	100,17
21	400-300	304,35	100,23
22	300-200	319,57	100,11
23	200-100	334,78	100,24
24	100-0	350,00	100,02
	Promedio		100,04
	Desviación estándar		0,2060
	Varianza muestral		0,0424

Figura B-4. Prueba 4 de medición en X.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en X ($\pm 0,04$ mm)
1	0-100	0,00	100,18
2	100-200	15,22	100,06
3	200-300	30,43	99,82
4	300-400	45,65	99,70
5	400-300	60,87	99,61
6	300-200	76,09	99,95
7	200-100	91,30	99,96
8	100-0	106,52	100,29
9	0-100	121,74	99,64
10	100-200	136,96	100,07
11	200-300	152,17	99,99
12	300-400	167,39	100,33
13	400-300	182,61	100,17
14	300-200	197,83	99,83
15	200-100	213,04	99,72
16	100-0	228,26	99,91
17	0-100	243,48	100,02
18	100-200	258,70	99,67
19	200-300	273,91	99,98
20	300-400	289,13	100,05
21	400-300	304,35	100,11
22	300-200	319,57	100,17
23	200-100	334,78	100,09
24	100-0	350,00	99,67
	Promedio		99,96

	Desviación estándar		0,2109
	Varianza muestral		0,0445

Figura B-5. Prueba 5 de medición en X.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en X ($\pm 0,05$ mm)
1	0-100	0,00	100,18
2	100-200	15,22	100,06
3	200-300	30,43	99,82
4	300-400	45,65	99,70
5	400-300	60,87	99,61
6	300-200	76,09	99,95
7	200-100	91,30	99,96
8	100-0	106,52	100,29
9	0-100	121,74	99,64
10	100-200	136,96	100,07
11	200-300	152,17	99,99
12	300-400	167,39	100,33
13	400-300	182,61	100,17
14	300-200	197,83	99,83
15	200-100	213,04	99,72
16	100-0	228,26	99,91
17	0-100	243,48	100,02
18	100-200	258,70	99,67
19	200-300	273,91	99,98
20	300-400	289,13	100,05
21	400-300	304,35	100,11
22	300-200	319,57	100,17
23	200-100	334,78	100,09
24	100-0	350,00	99,67
	Promedio		99,96
	Desviación estándar		0,2109
	Varianza muestral		0,0445

Figura B-6. Prueba 1 de medición en Y.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en Y ($\pm 0,03$ mm)
1	0,00	0-100	100,08
2	17,39	100-200	100,24
3	34,78	200-300	99,96

4	52,17	300-200	99,94
5	69,57	200-100	100,03
6	86,96	100-0	99,78
7	104,35	0-100	100,13
8	121,74	100-200	99,95
9	139,13	200-300	100,00
10	156,52	300-200	99,82
11	173,91	200-100	100,05
12	191,30	100-0	100,04
13	208,70	0-100	99,84
14	226,09	100-200	100,24
15	243,48	200-300	100,18
16	260,87	300-200	100,01
17	278,26	200-100	99,86
18	295,65	100-0	100,04
19	313,04	0-100	99,98
20	330,43	100-200	100,15
21	347,83	200-300	100,13
22	365,22	300-200	100,20
23	382,61	200-100	99,85
24	400,00	100-0	100,08
	Promedio		100,02
	Desviación estándar		0,13
	Varianza muestral		0,01805580

Figura B-7. Prueba 2 de medición en Y.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en Y ($\pm 0,03$ mm)
1	0,00	0-100	99,98
2	17,39	100-200	100,13
3	34,78	200-300	100,14
4	52,17	300-200	100,04
5	69,57	200-100	99,80
6	86,96	100-0	100,18
7	104,35	0-100	99,92
8	121,74	100-200	99,85
9	139,13	200-300	100,03
10	156,52	300-200	100,06
11	173,91	200-100	99,75
12	191,30	100-0	100,15

13	208,70	0-100	100,30
14	226,09	100-200	99,82
15	243,48	200-300	100,21
16	260,87	300-200	99,99
17	278,26	200-100	99,87
18	295,65	100-0	99,75
19	313,04	0-100	99,83
20	330,43	100-200	100,14
21	347,83	200-300	100,18
22	365,22	300-200	100,19
23	382,61	200-100	100,12
24	400,00	100-0	99,82
	Promedio		100,01
	Desviación estándar		0,1669
	Varianza muestral		0,0278

Figura B-8. Prueba 3 de medición en Y.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en Y ($\pm 0,03$ mm)
1	0,00	0-100	99,95
2	17,39	100-200	99,95
3	34,78	200-300	100,08
4	52,17	300-200	99,92
5	69,57	200-100	100,18
6	86,96	100-0	99,88
7	104,35	0-100	100,18
8	121,74	100-200	99,77
9	139,13	200-300	99,75
10	156,52	300-200	99,97
11	173,91	200-100	99,79
12	191,30	100-0	100,09
13	208,70	0-100	100,18
14	226,09	100-200	99,73
15	243,48	200-300	99,78
16	260,87	300-200	100,15
17	278,26	200-100	99,80
18	295,65	100-0	99,88
19	313,04	0-100	99,84
20	330,43	100-200	100,04
21	347,83	200-300	99,88

22	365,22	300-200	100,28
23	382,61	200-100	99,81
24	400,00	100-0	99,70
	Promedio		99,94
	Desviación estándar		0,1694
	Varianza muestral		0,0287

Figura B-9. Prueba 4 de medición en Y.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en Y ($\pm 0,04$ mm)
1	0,00	0-100	100,19
2	17,39	100-200	99,77
3	34,78	200-300	100,06
4	52,17	300-200	100,15
5	69,57	200-100	100,05
6	86,96	100-0	99,82
7	104,35	0-100	100,23
8	121,74	100-200	100,23
9	139,13	200-300	99,76
10	156,52	300-200	100,28
11	173,91	200-100	99,72
12	191,30	100-0	100,03
13	208,70	0-100	99,93
14	226,09	100-200	100,10
15	243,48	200-300	99,84
16	260,87	300-200	99,94
17	278,26	200-100	100,26
18	295,65	100-0	100,10
19	313,04	0-100	99,84
20	330,43	100-200	99,79
21	347,83	200-300	99,74
22	365,22	300-200	99,98
23	382,61	200-100	100,16
24	400,00	100-0	99,80
	Promedio		99,99
	Desviación estándar		0,1855
	Varianza muestral		0,0344

Figura B-10. Prueba 5 de medición en Y.

	Coordenada X (mm)	Coordenada Y (mm)	Medida en Y ($\pm 0,04$ mm)
1	0,00	0-100	99,76
2	17,39	100-200	99,96
3	34,78	200-300	99,93
4	52,17	300-200	100,24
5	69,57	200-100	99,98
6	86,96	100-0	99,92
7	104,35	0-100	100,05
8	121,74	100-200	100,13
9	139,13	200-300	99,96
10	156,52	300-200	99,79
11	173,91	200-100	99,73
12	191,30	100-0	99,87
13	208,70	0-100	100,22
14	226,09	100-200	99,70
15	243,48	200-300	99,72
16	260,87	300-200	100,04
17	278,26	200-100	100,21
18	295,65	100-0	99,70
19	313,04	0-100	100,00
20	330,43	100-200	100,26
21	347,83	200-300	99,94
22	365,22	300-200	99,82
23	382,61	200-100	99,73
24	400,00	100-0	100,18
	Promedio		99,95
	Desviación estándar		0,1856
	Varianza muestral		0,0344

C. Apéndice C. Resultados financieros sin el costo de diseño.

En este caso se considerando que la licencia del programa de diseño ingenieril en 3D Inventor es un costo hundido, es decir un costo que la empresa no cubre ya que el programa ya se encuentra disponible y el costo de diseño se toma como descartado ya que por acuerdo entre diseñador y empresa el monto no es parte del costo, por lo tanto, eliminando los costos no aplicables en este caso se obtiene el monto que se debe invertir para la implementación, el cual corresponde a ₴346 587,58.

Tabla C-1. Costos de implementación de la máquina.

Aspecto	Costo (₴)
Materiales eléctricos	91 116,78
Materiales Mecánicos	72 711,80
Materiales de la carcasa	91 434
Impresión 3D	30 789
Licencia del programa de dibujo (Inventor)	0
Licencia del programa de control (LightBurn)	37 320
Diseñador	0
Costo de ensamble	23 216
Total	346587,58

Si se realiza un análisis de los indicadores financieros, con el monto de implementación de la máquina del proyecto proyectado a 4 años, se obtiene los resultados de los indicadores financieros que se muestran en la Tabla C-2. considerando el ingreso de ₴120 960 anual generado por la máquina únicamente con el servicio de grabado y la tasa de actualización igual al 5%.

Tabla C-2. Indicadores financieros únicamente con los costos de implementación.

Indicador financiero	Valor obtenido
VAN	82 330,59
TIR	15 %
ROI	39,6%

De la tabla anterior, para el caso descrito, el VAN muestra un valor mayor a 0, lo que asegura que esta inversión llega a recuperarse a un tiempo cercano a los 4 años con los ingresos que genera el servicio de grabado, además, al obtener un TIR mayor a 0 y mayor a la tasa de actualización determina el indicador como positivo para esta inversión, como también el caso del retorno de la inversión que a 4 años de dar la inversión es positivo con un valor igual a 39,6%.

D. Apéndice D. Encuesta de necesidades.

- ¿Que se quiere hacer?

Desde hace un tiempo atrás entre la pareja fundadora de Hartmade® se estaba hablando acerca la posibilidad de adquirir una máquina láser pequeña, donde la principal función es el grabado superficial.

- ¿Qué características se desean?

- La portabilidad, con la capacidad de ser transportada con facilidad
- Grabado mediante láser que permita mostrar el proceso
- Dimensiones grandes de 50x25 cm en el área de trabajo, con una posibilidad de trabajar proyectos con 5 cm de alto.
- Entre los materiales es principalmente la madera y derivados como MDF, el acrílico se trabaja muy poco.

- ¿Por qué la portabilidad?

La idea de la portabilidad es para poder transportar la maquina porque la máquina que se posee, aunque es de las pequeñas en el mercado tienen una estructura pesada, con enfriamiento líquido, trabaja a 220 V y tiene partes muy delicadas como el láser que es como un bulbo de vidrio; por lo que llevar la maquina es riesgoso, costoso y difícil.

- ¿El tamaño de 50x25 cm es grande?

Si, el tema es que hemos trabajado con láminas de ese tamaño y hemos tenido que realizar cierto grabado en alguna parte, ese tamaño se vuelve versátil para trabajar en cuestión de tamaño, la altura definida es porque realizamos cajas donde han pasado casos donde la altura de solo la tapa es alta.

Ese tamaño la maquina va a ser grande pero aún así la idea es que quepa en un escritorio o una mesa y no necesite de patas al suelo para poder ser transportado fácil en un carro.

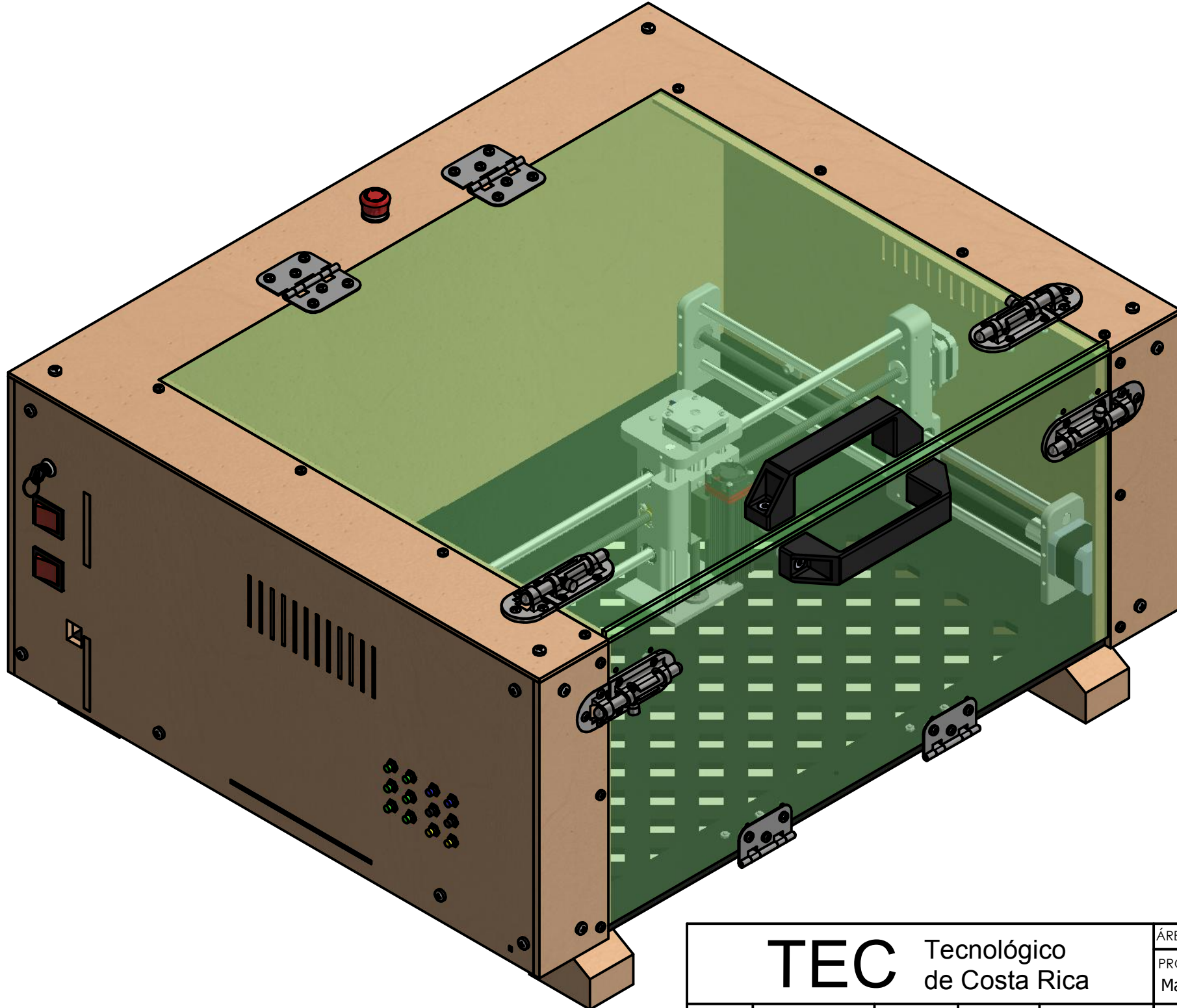
- ¿Para qué se quiere?

En Hartmade® hemos visto que en ferias de negocios los clientes o críticos llegan y no conocen la tecnología, les hablamos sobre la oportunidad de personalización, pero no podemos realizarlo en el momento, por esta razón nos interesa el grabado en una máquina donde el láser pueda ser conectado, transportado y ponerlo en marcha con facilidad.

Un aspecto más es que ahorita la empresa es completamente virtual, un proyecto que tenemos es de abrir una tienda física para lograr personalizar en el momento, así el cliente no tenga que esperar días para recibir el producto y la creación sea en vivo. Creemos que al atender al cliente y mostrarle de forma presencial podemos enamorarlo con lo que producimos, con la máquina láser pequeña podemos en una mesa segura mostrar lo que hacemos y así buscar un auge en el mercado y una oportunidad de desarrollo

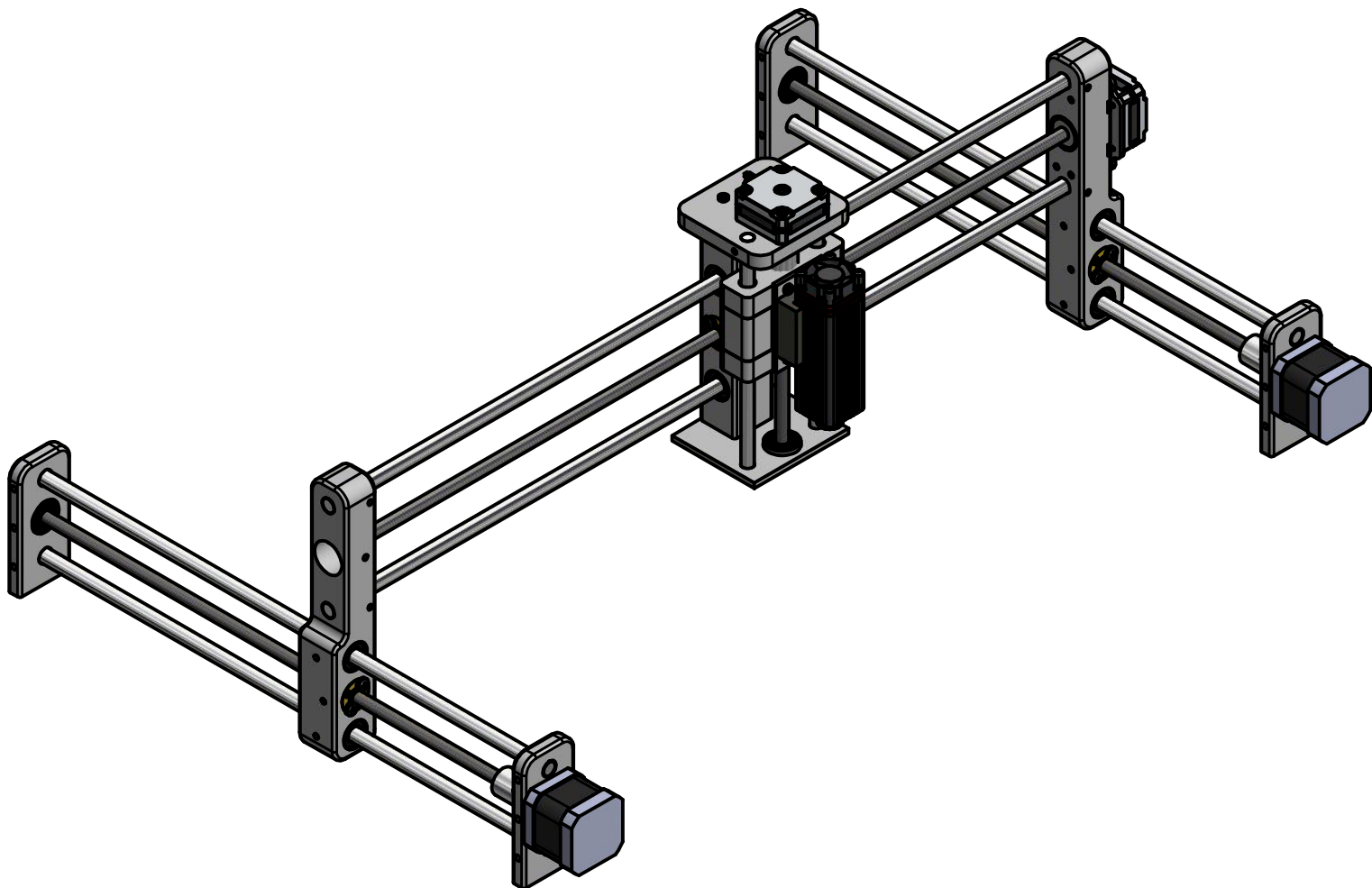
E. Apéndice E. Planos mecánicos

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

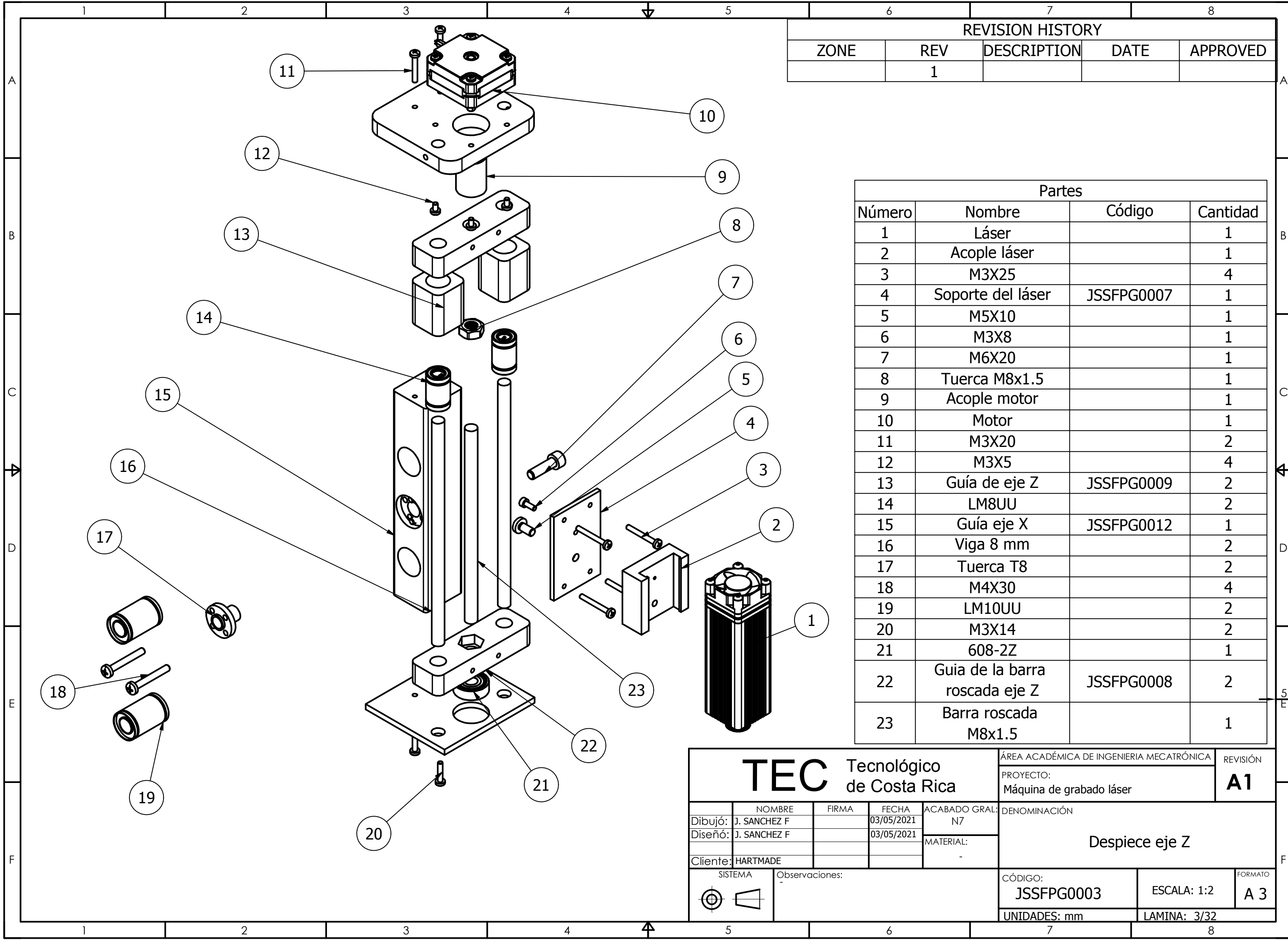


TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Vista General	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: -		
Cliente:	HARTMADE			SISTEMA		
Observaciones:				CÓDIGO: JSSFPG0001		FORMATO A 3
				UNIDADES: mm		ESCALA: 1:4 LAMINA: 1/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Vista general de la estructura de los ejes	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: -		
Cliente:	HARTMADE			Observaciones:		
SISTEMA		Observaciones:		CÓDIGO: JSSFPG0002	ESCALA: 1:4	FORMATO A 3
				UNIDADES: mm	LAMINA: 2/32	

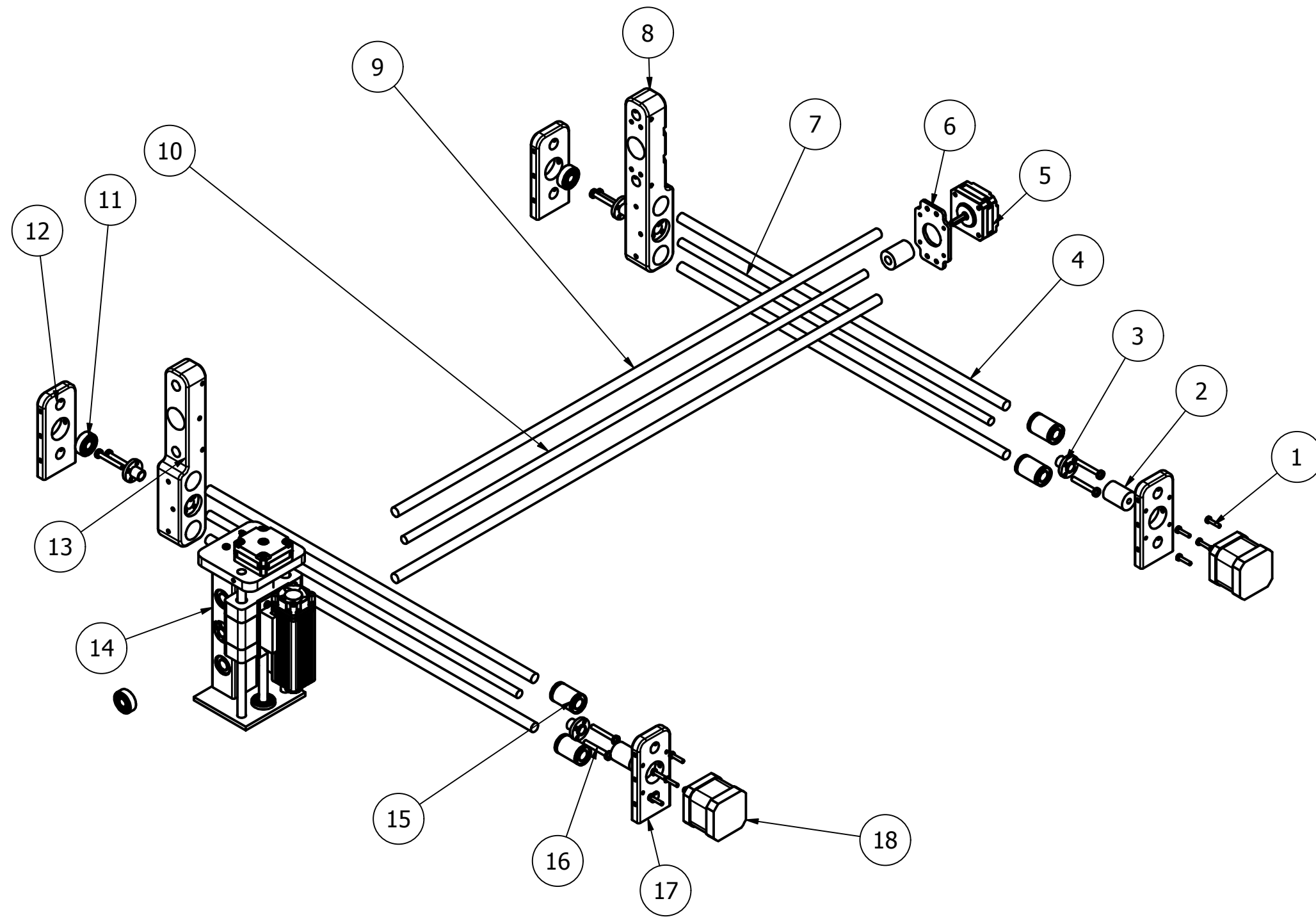


REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

Partes			
Número	Nombre	Código	Cantidad
1	Láser		1
2	Acople láser		1
3	M3X25		4
4	Soporte del láser	JSSFPG0007	1
5	M5X10		1
6	M3X8		1
7	M6X20		1
8	Tuerca M8x1.5		1
9	Acople motor		1
10	Motor		1
11	M3X20		2
12	M3X5		4
13	Guía de eje Z	JSSFPG0009	2
14	LM8UU		2
15	Guía eje X	JSSFPG0012	1
16	Viga 8 mm		2
17	Tuerca T8		2
18	M4X30		4
19	LM10UU		2
20	M3X14		2
21	608-2Z		1
22	Guía de la barra roscada eje Z	JSSFPG0008	2
23	Barra roscada M8x1.5		1

TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN Despiece eje Z	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7		
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:		
SISTEMA	Observaciones:			CÓDIGO:	ESCALA: 1:2	FORMATO
				JSSFPG0003		A 3
				UNIDADES: mm	LAMINA: 3/32	

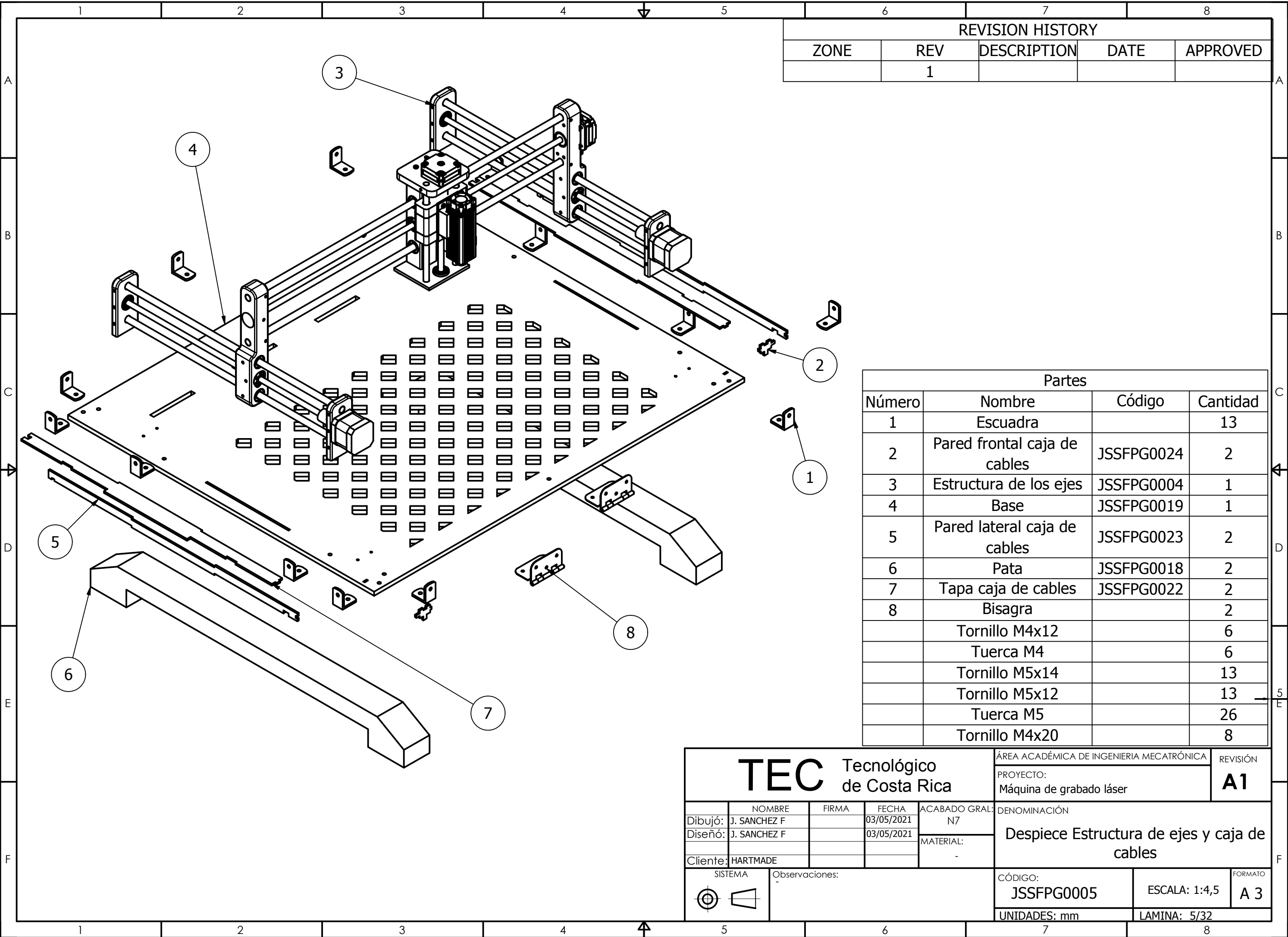
REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



Partes			
Número	Nombre	Código	Cantidad
1	M3x14		8
2	Acople motor		3
3	Tuerca T8		6
4	Viga Y		4
5	Motor X		1
6	Soporte de motor X	JSSFPG0015	1
7	Varilla T8 Y		2
8	Guia del eje Y derecha	JSSFPG0013	1
9	Viga X		2
10	Varilla T8 X		1
11	608-2Z		3
12	Esquina Y	JSSFPG0017	2
13	Guia del eje Y izquierda	JSSFPG0014	1
14	Eje Z	JSSFPG0003	1
15	LM10UU		6
16	M4x30		12
17	Soporte del motor Y	JSSFPG0016	2
18	Motor Y		2

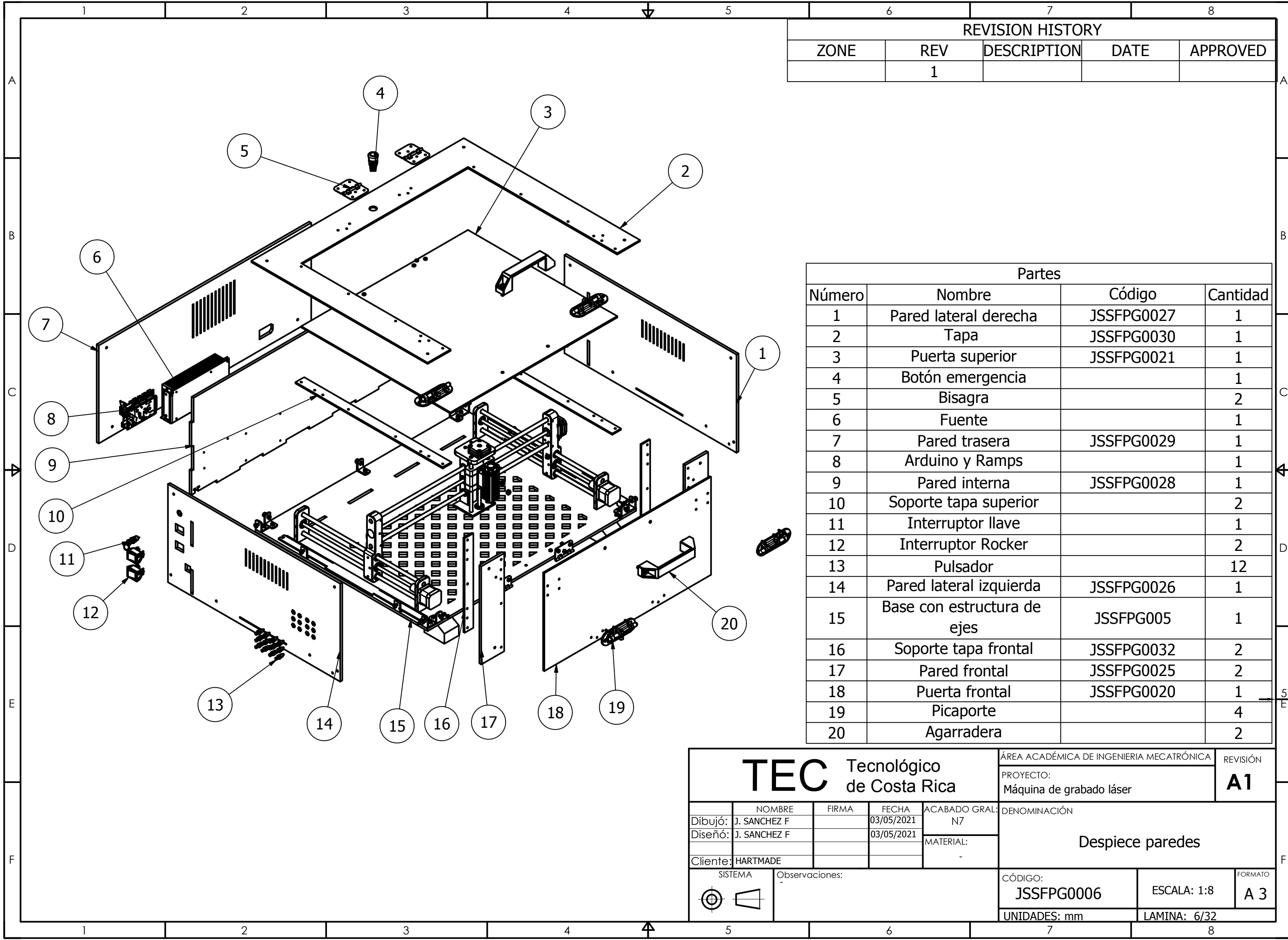
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Despiece del eje X y Y	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: -		
Cliete:	HARTMADE				CÓDIGO: JSSFPG0004	FORMATO A 3
SISTEMA		Observaciones:			UNIDADES: mm	ESCALA: 1:4,5
					LAMINA: 4/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



Partes			
Número	Nombre	Código	Cantidad
1	Escuadra		13
2	Pared frontal caja de cables	JSSFPG0024	2
3	Estructura de los ejes	JSSFPG0004	1
4	Base	JSSFPG0019	1
5	Pared lateral caja de cables	JSSFPG0023	2
6	Pata	JSSFPG0018	2
7	Tapa caja de cables	JSSFPG0022	2
8	Bisagra		2
	Tornillo M4x12		6
	Tuerca M4		6
	Tornillo M5x14		13
	Tornillo M5x12		13
	Tuerca M5		26
	Tornillo M4x20		8

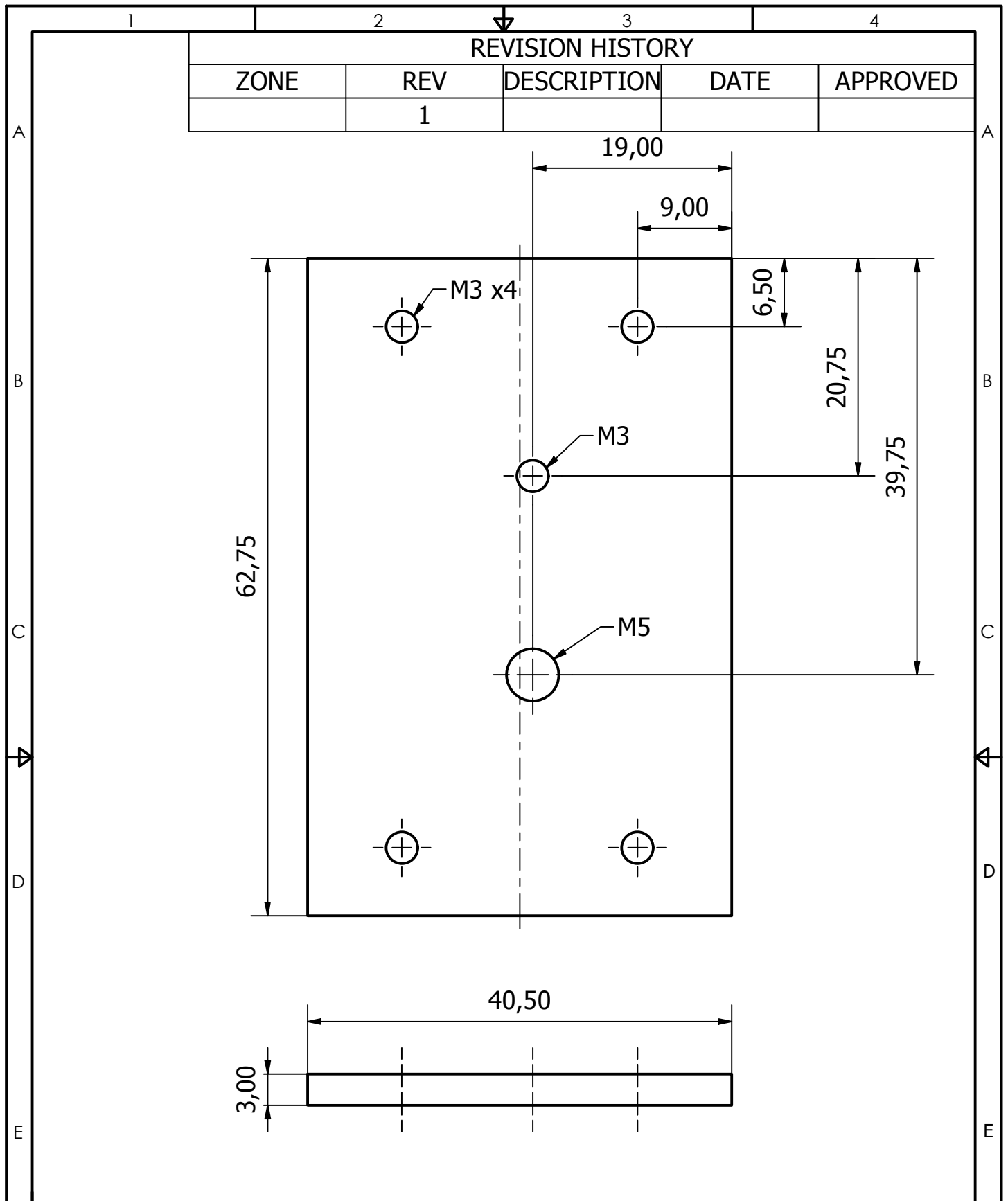
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN			
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1			
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA		FECHA:	03/05/2021	ACABADO GRAL:	N7	DENOMINACIÓN Despiece Estructura de ejes y caja de cables	
Diseño:	J. SANCHEZ F			FECHA:	03/05/2021	MATERIAL:	-		
Cliente:	HARTMADE		SISTEMA		Observaciones:		CÓDIGO: JSSFPG0005	ESCALA: 1:4,5	FORMATO A 3
						UNIDADES: mm		LAMINA: 5/32	




REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

Partes			
Número	Nombre	Código	Cantidad
1	Pared lateral derecha	JSSFPG0027	1
2	Tapa	JSSFPG0030	1
3	Puerta superior	JSSFPG0021	1
4	Botón emergencia		1
5	Bisagra		2
6	Fuente		1
7	Pared trasera	JSSFPG0029	1
8	Arduino y Ramps		1
9	Pared interna	JSSFPG0028	1
10	Soporte tapa superior		2
11	Interruptor llave		1
12	Interruptor Rocker		2
13	Pulsador		12
14	Pared lateral izquierda	JSSFPG0026	1
15	Base con estructura de ejes	JSSFPG005	1
16	Soporte tapa frontal	JSSFPG0032	2
17	Pared frontal	JSSFPG0025	2
18	Puerta frontal	JSSFPG0020	1
19	Picaporte		4
20	Agarradera		2

TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN	
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1	
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA		FECHA:	03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN: Despiece paredes
Diseño:	J. SANCHEZ F			03/05/2021			
Cliente:	HARTMADE		MATERIAL:		-		
SISTEMA		Observaciones:				CÓDIGO:	FORMATO:
						JSSFPG0006	A 3
UNIDADES: mm						ESCALA: 1:8	LAMINA: 6/32

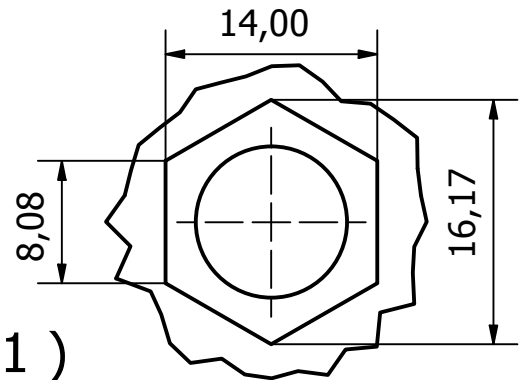
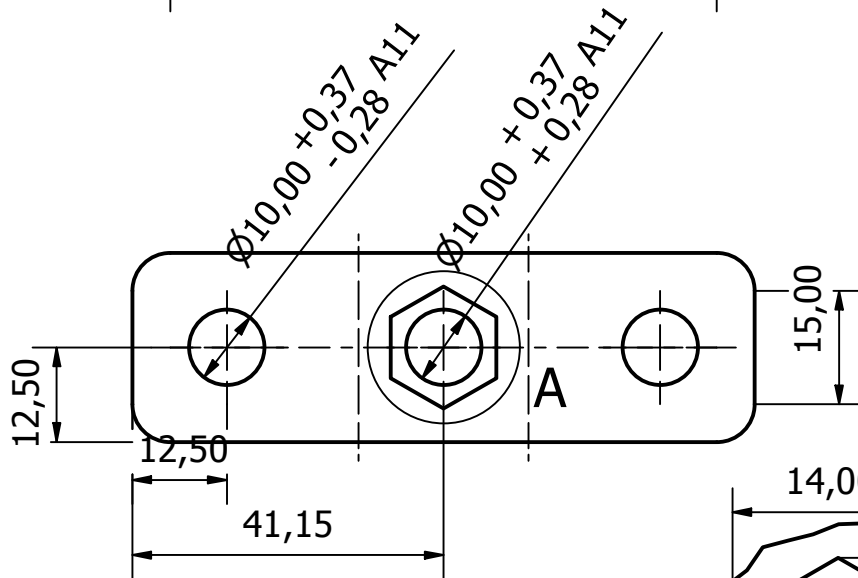
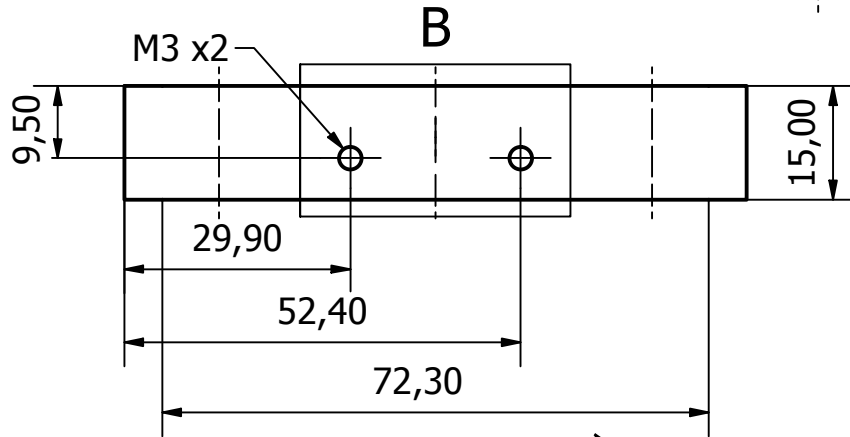
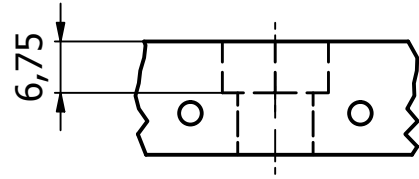


REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN	
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1	
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Soporte del láser		
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: ASA			
Cliente:	HARTMADE						
SISTEMA 		Observaciones: Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario Los orificios no acotados presentan las mismas dimensiones del que se encuentra acotado			CÓDIGO: JSSFPG0007	ESCALA: 2:1	FORMATO A 4
					UNIDADES: mm	LAMINA: 7/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

B (1 : 1)



A (2 : 1)

TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

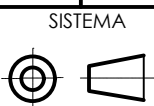
REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			ASA

DENOMINACIÓN
Guía de la barra roscada del eje Z



Observaciones:
Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario
Los orificios no acotados presentan las mismas dimensiones del que se encuentra acotado

CÓDIGO:
JSSFPG0008

ESCALA: 1:1

FORMATO
A 4

UNIDADES: mm

LAMINA: 8/32

1

2

3

4

REVISION HISTORY

ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

A

A

B

B

C

C

D

D

E

E

12,50

30,75

R5,00

Ø15,000 +0,018
-0,000 H7

25,00

25,00

TEC

 Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

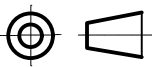
REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Aprobó:				ASA
Cliente:	HARTMADE			

DENOMINACIÓN	Guía del eje Z
CÓDIGO:	

SISTEMA 	Observaciones: Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario

CÓDIGO:	ESCALA: 2:1	FORMATO
JSSFPG0009		A 4
UNIDADES: mm	LAMINA: 9/32	

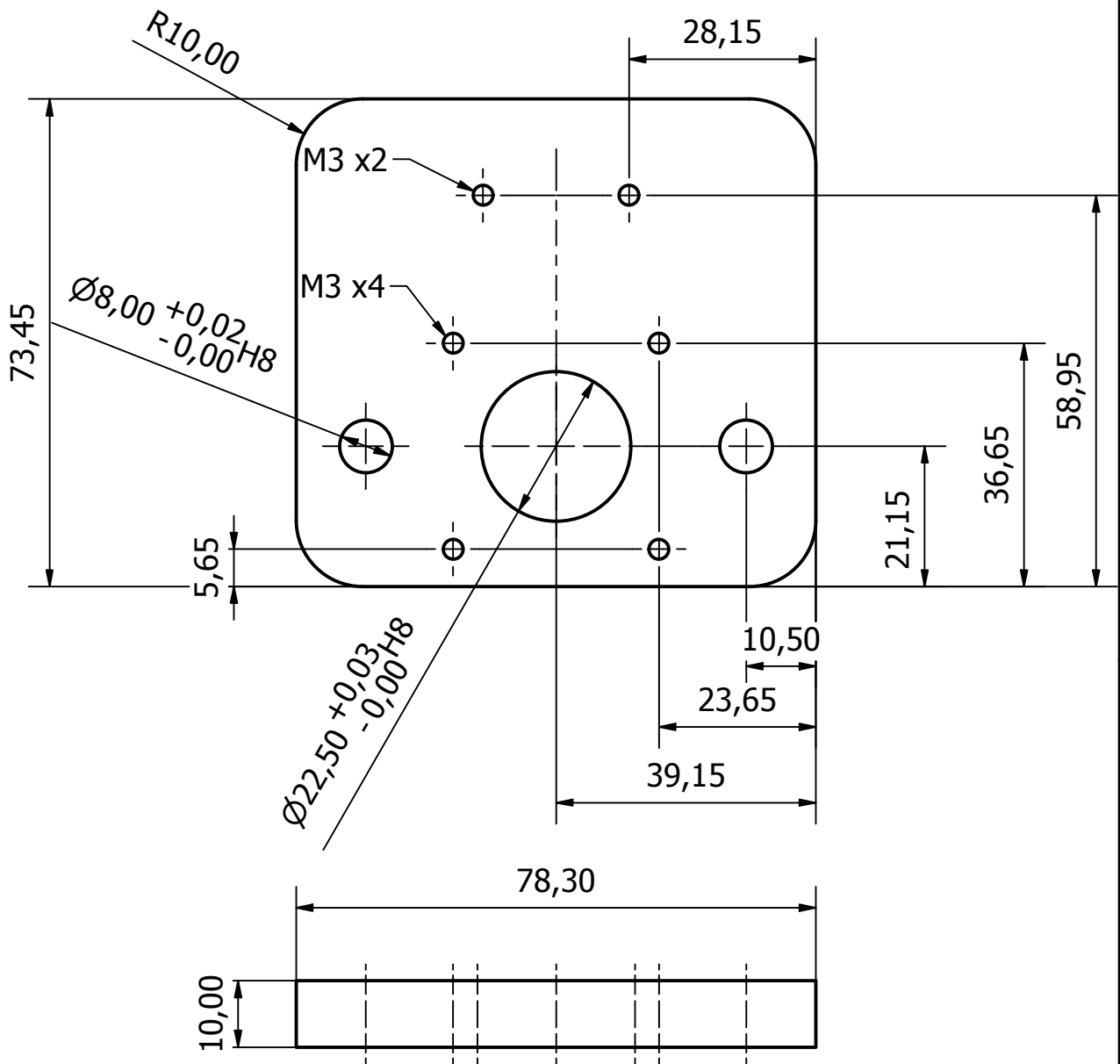
1

2

3

4

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA



REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			ASA

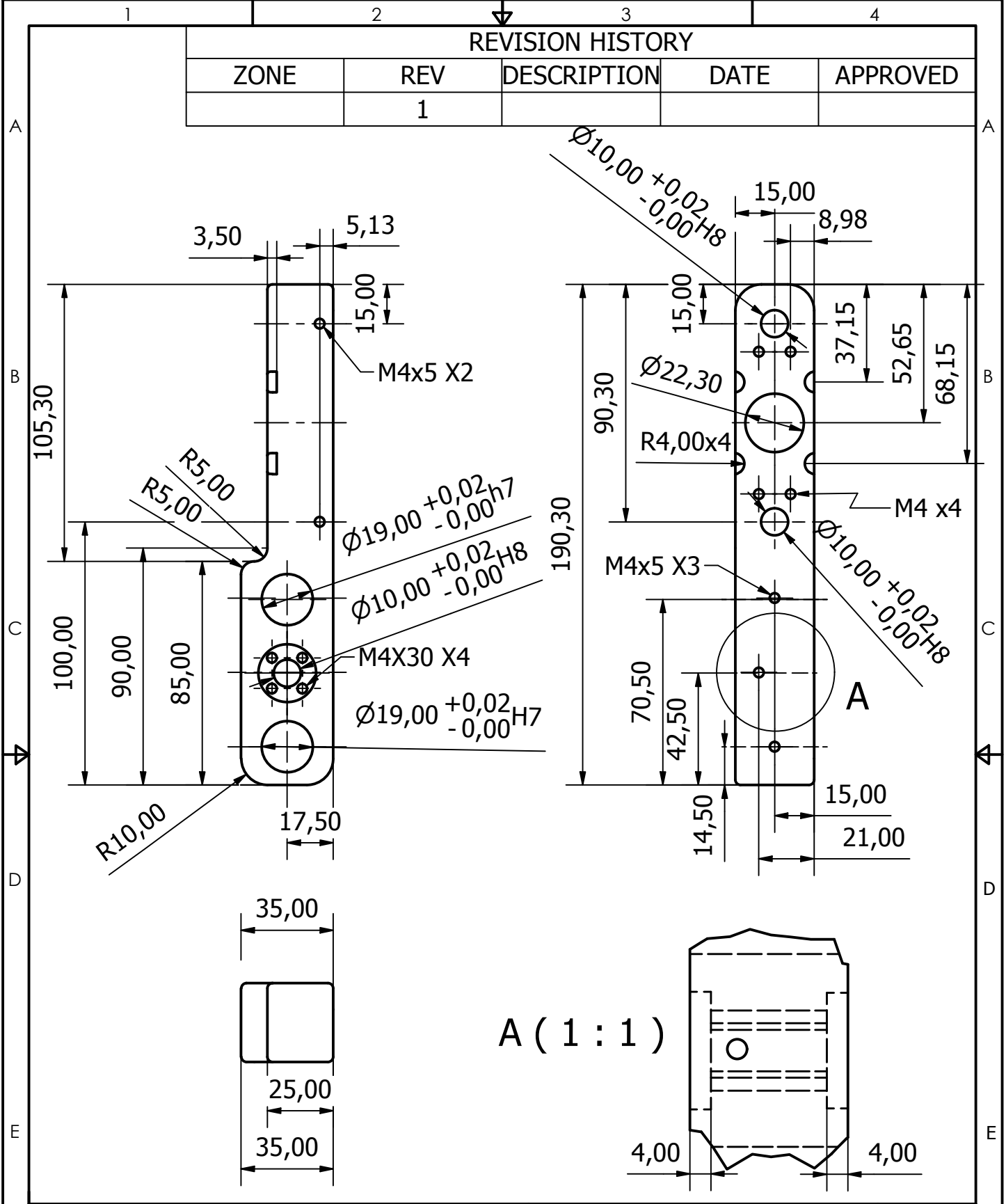
DENOMINACIÓN
Soporte de motor Z

SISTEMA
 
Observaciones:
Los filetes serán de 2 mm.
Los orificios no acotados presentan las mismas dimensiones del que se encuentra acotado con respecto al eje de simetría

CÓDIGO:
JSSFPG0010
UNIDADES: mm

ESCALA: 1:1
LAMINA: 10/32
FORMATO: A 4

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



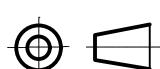
A (1 : 1)

TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA REVISIÓN
 PROYECTO: Máquina de grabado láser **A1**

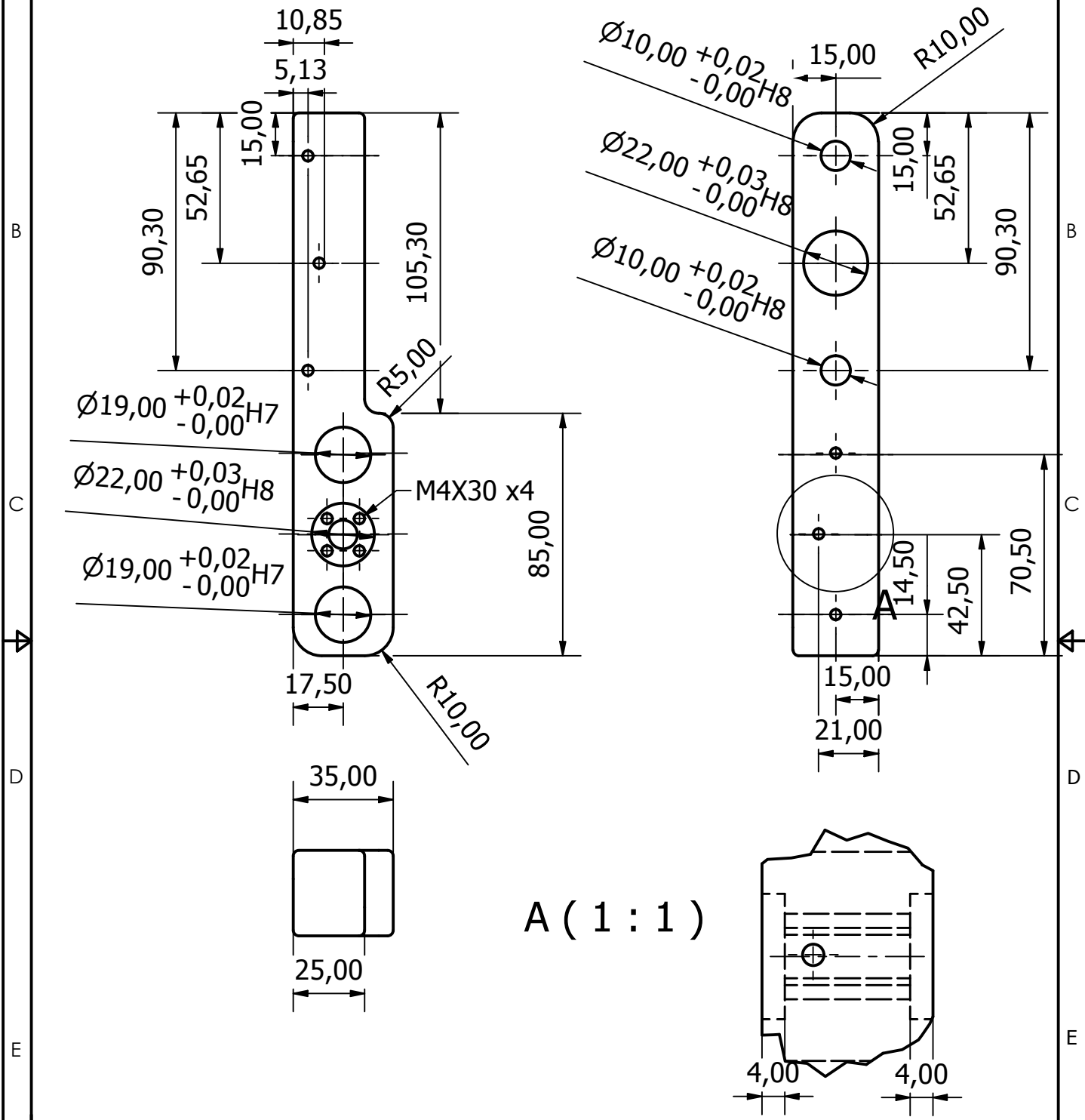
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			ASA

DENOMINACIÓN
Guía del eje Y derecha

SISTEMA  Observaciones:
 Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario

CÓDIGO: **JSSFPG0013** ESCALA: 1:2 FORMATO: A 4
 UNIDADES: mm LAMINA: 13/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			




A (1 : 1)

TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA REVISIÓN
 PROYECTO: Máquina de grabado láser **A1**

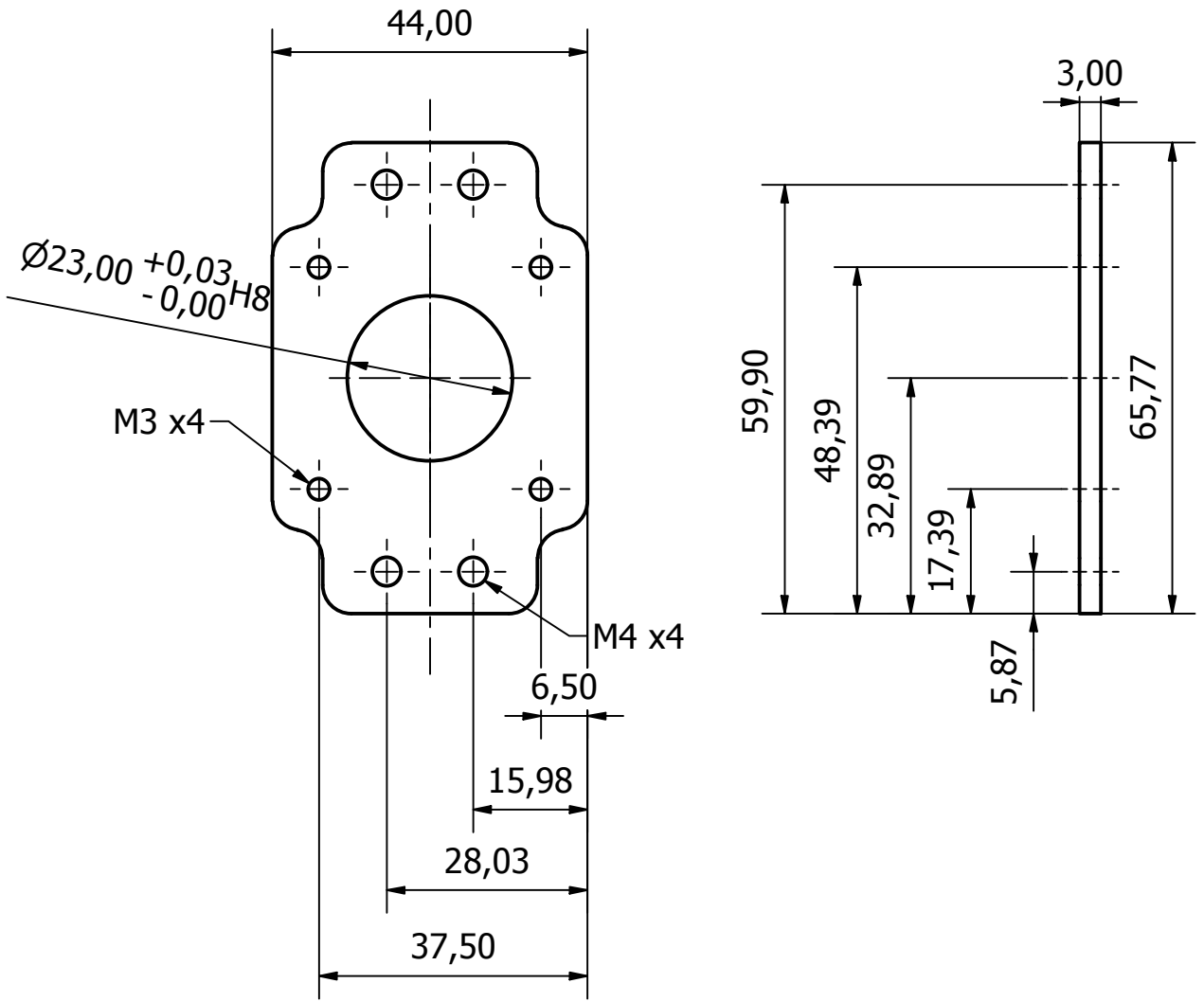
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			ASA

DENOMINACIÓN
Guía del eje Y izquierda

SISTEMA  Observaciones:
 Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario

CÓDIGO: **JSSFPG0014** ESCALA: 1:2 FORMATO: A 4
 UNIDADES: mm LAMINA: 14/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

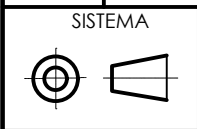
REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			ASA

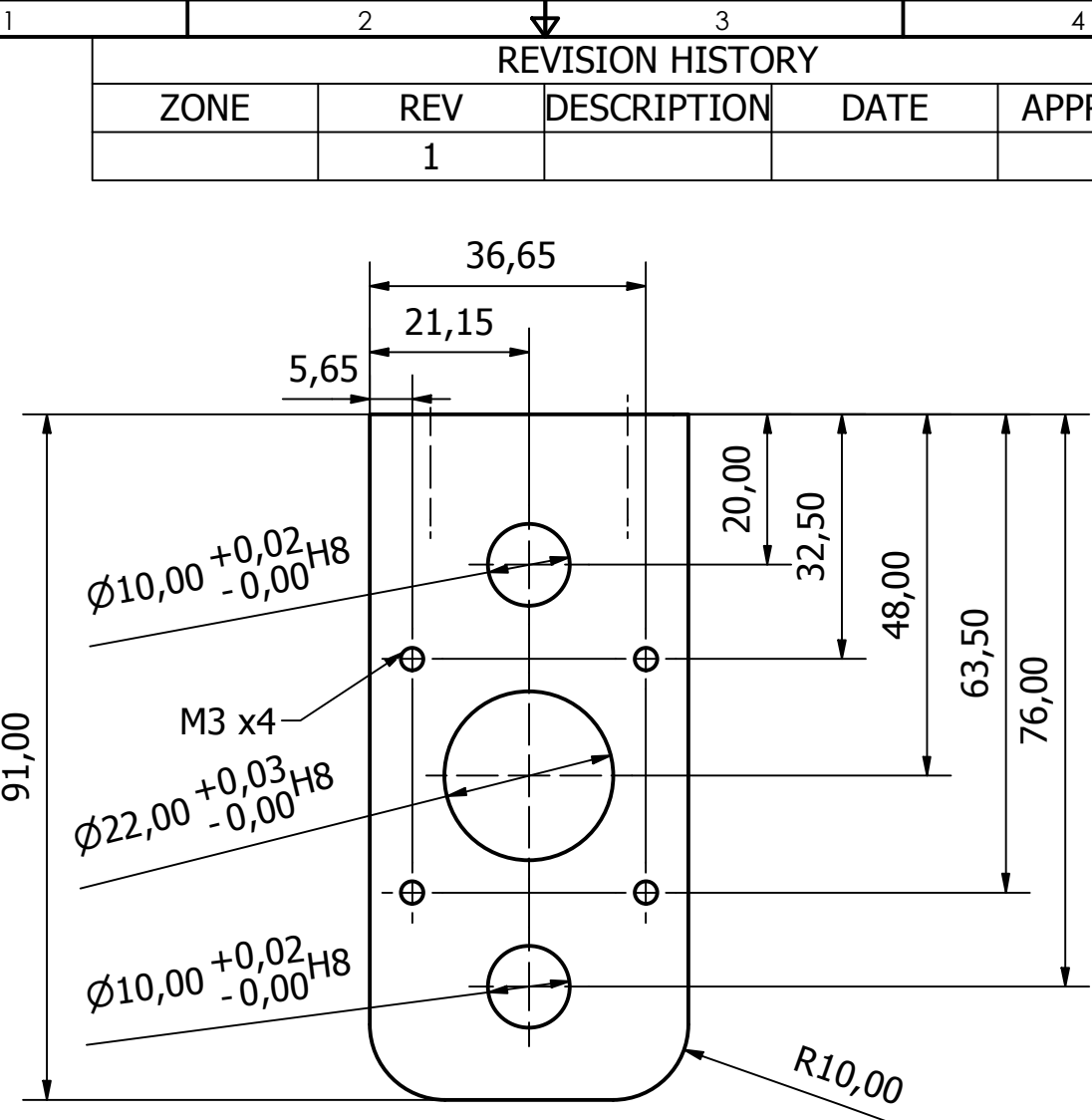
DENOMINACIÓN	Soporte del motor X
CÓDIGO:	



Observaciones:
Los orificios no acotados presentan las mismas dimensiones del que se encuentra acotado con respecto al eje de simetría

CÓDIGO:	JSSFPG0015
UNIDADES:	mm

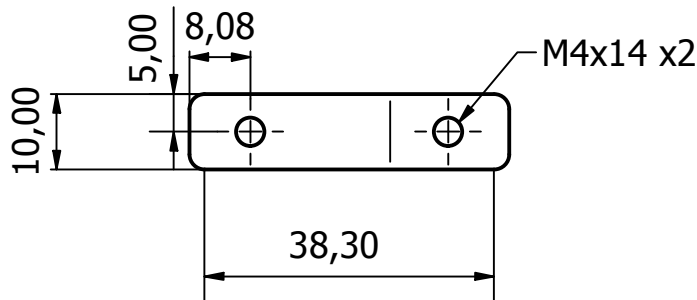
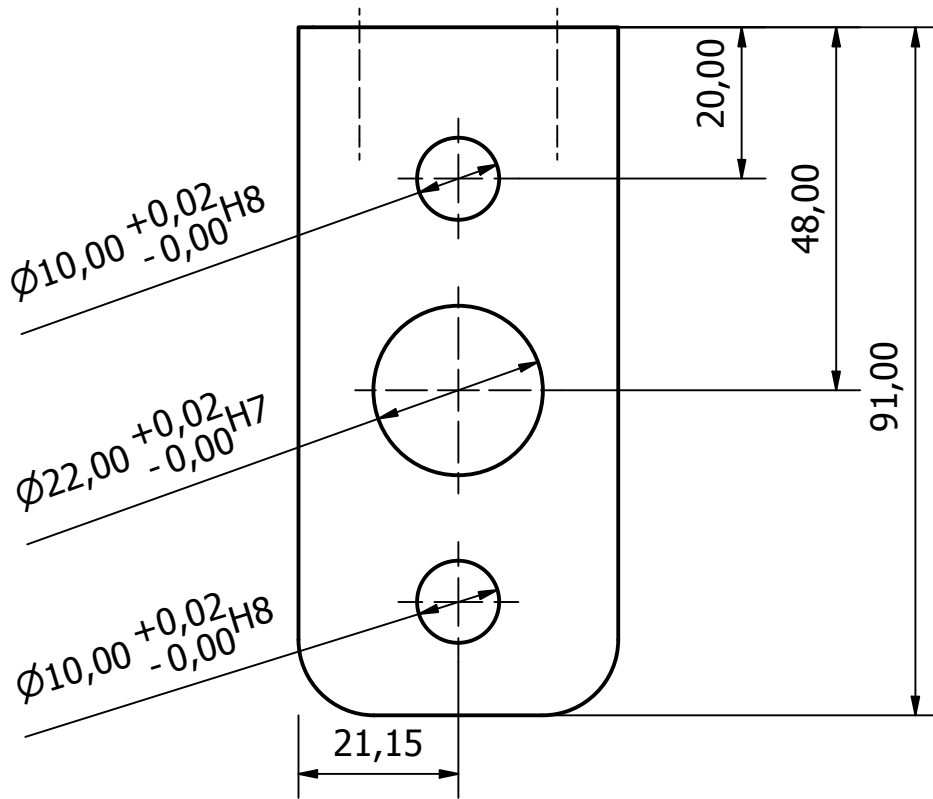
ESCALA:	1:1	FORMATO:	A 4
LAMINA:	15/32		



REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN		
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1		
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA:		FECHA:	03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Soporte de motor Y	
Diseño:	J. SANCHEZ F				03/05/2021			MATERIAL: ASA
Cliente:	HARTMADE							
SISTEMA 		Observaciones: Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario			CÓDIGO: JSSFPG0016		ESCALA: 1:1	FORMATO A 4
					UNIDADES: mm		LAMINA: 16/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			ASA

DENOMINACIÓN
Esquina del eje Y

SISTEMA	Observaciones:
	Los filetes serán de 2 mm. Los orificios no acotados presentan las mismas dimensiones del que se encuentra acotado con respecto al eje de simetría

CÓDIGO:	ESCALA:	FORMATO
JSSFPG0017	1:1	A 4
UNIDADES: mm	LAMINA: 17/32	

1

2

3

4

REVISION HISTORY

ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

A

A

B

B

C

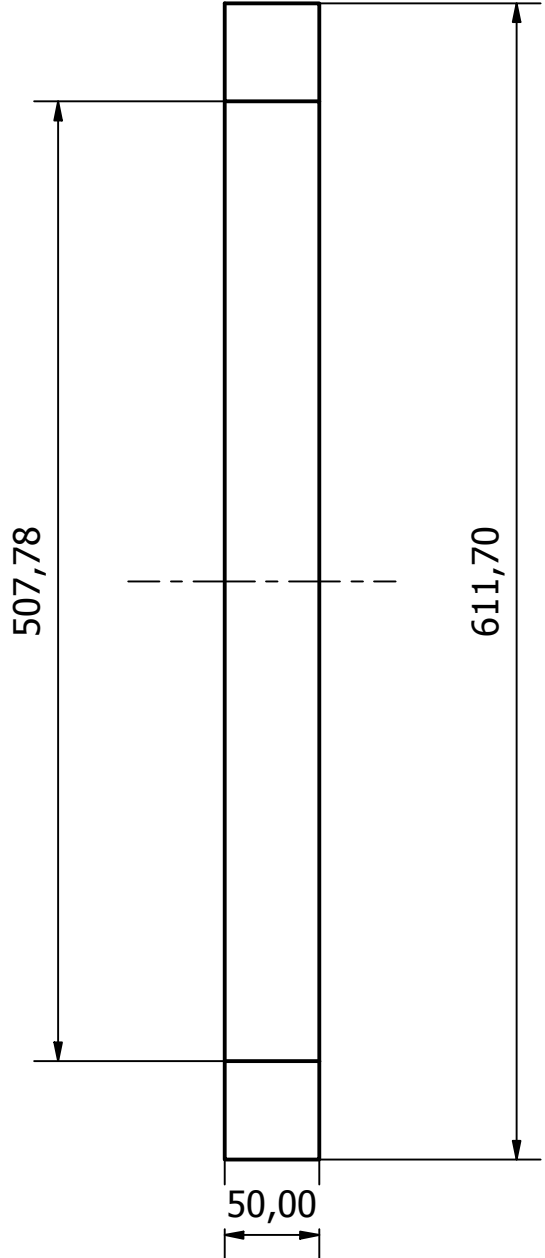
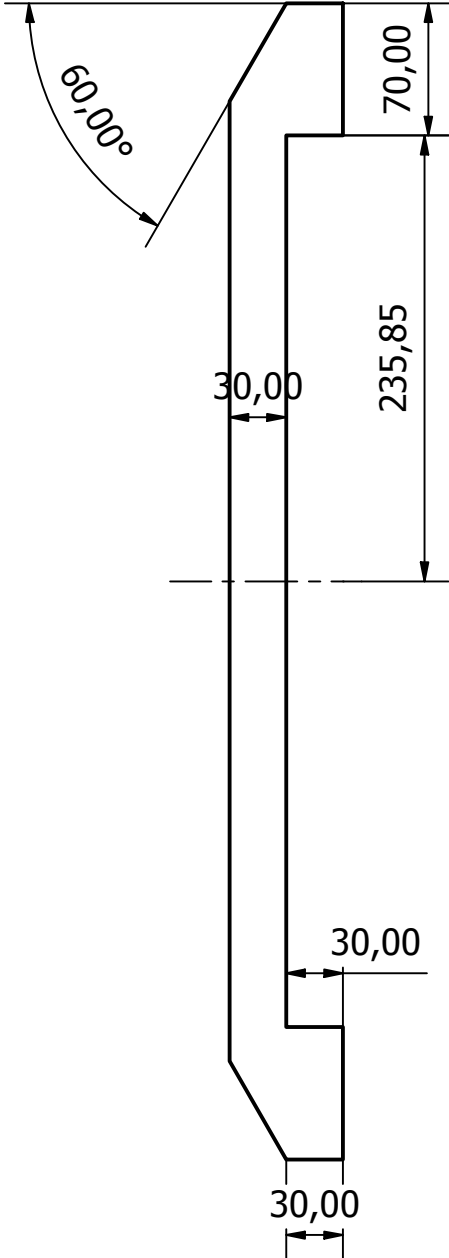
C

D

D

E

E



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			Madera

DENOMINACIÓN	Pata
CÓDIGO:	

SISTEMA	Observaciones: Los filetes serán de 2 mm a menos que se indique lo contrario
---------	---

JSSFPG0018	ESCALA: 1:4	FORMATO A 4
UNIDADES: mm	LAMINA: 18/32	

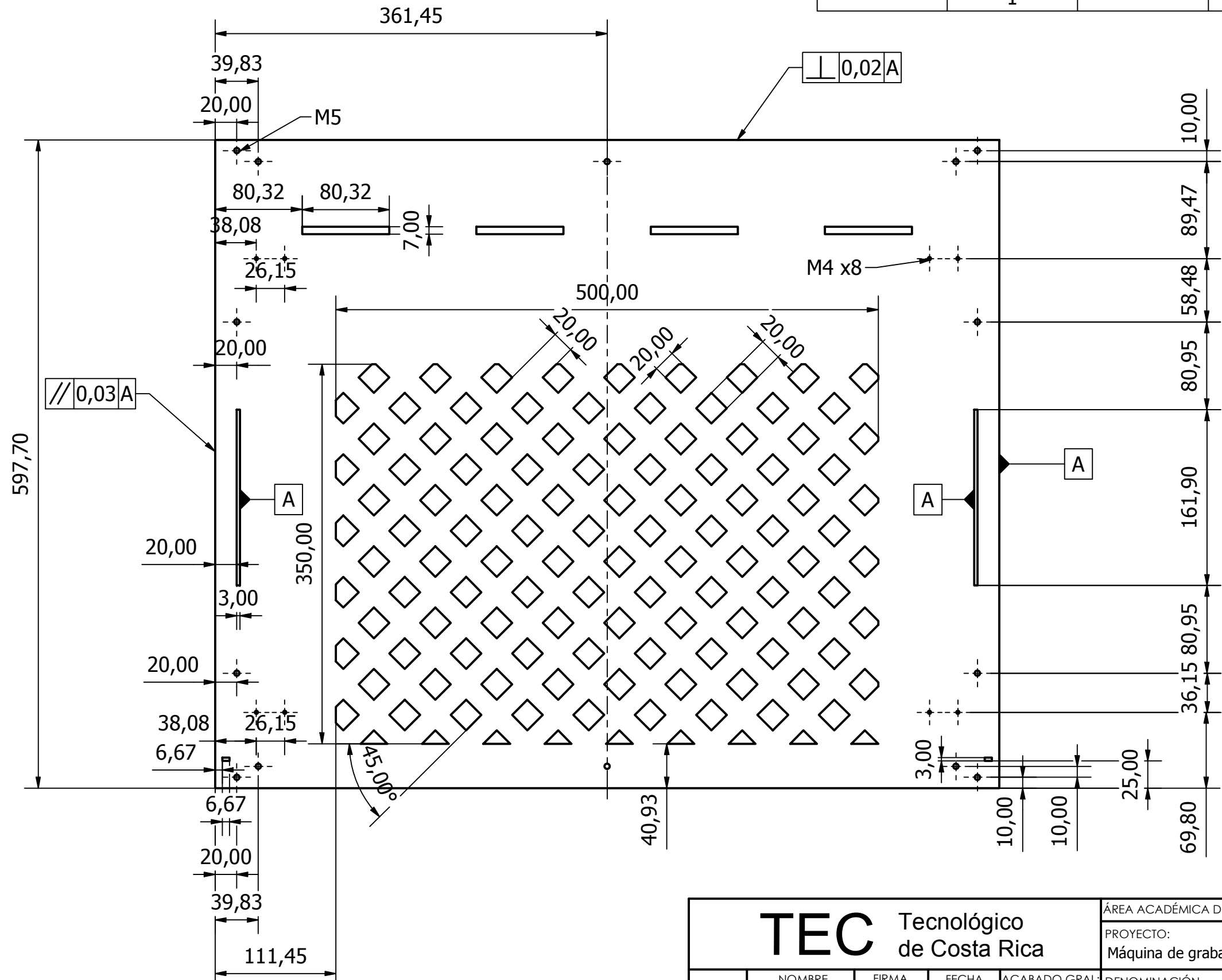
1

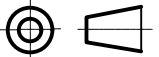
2

3

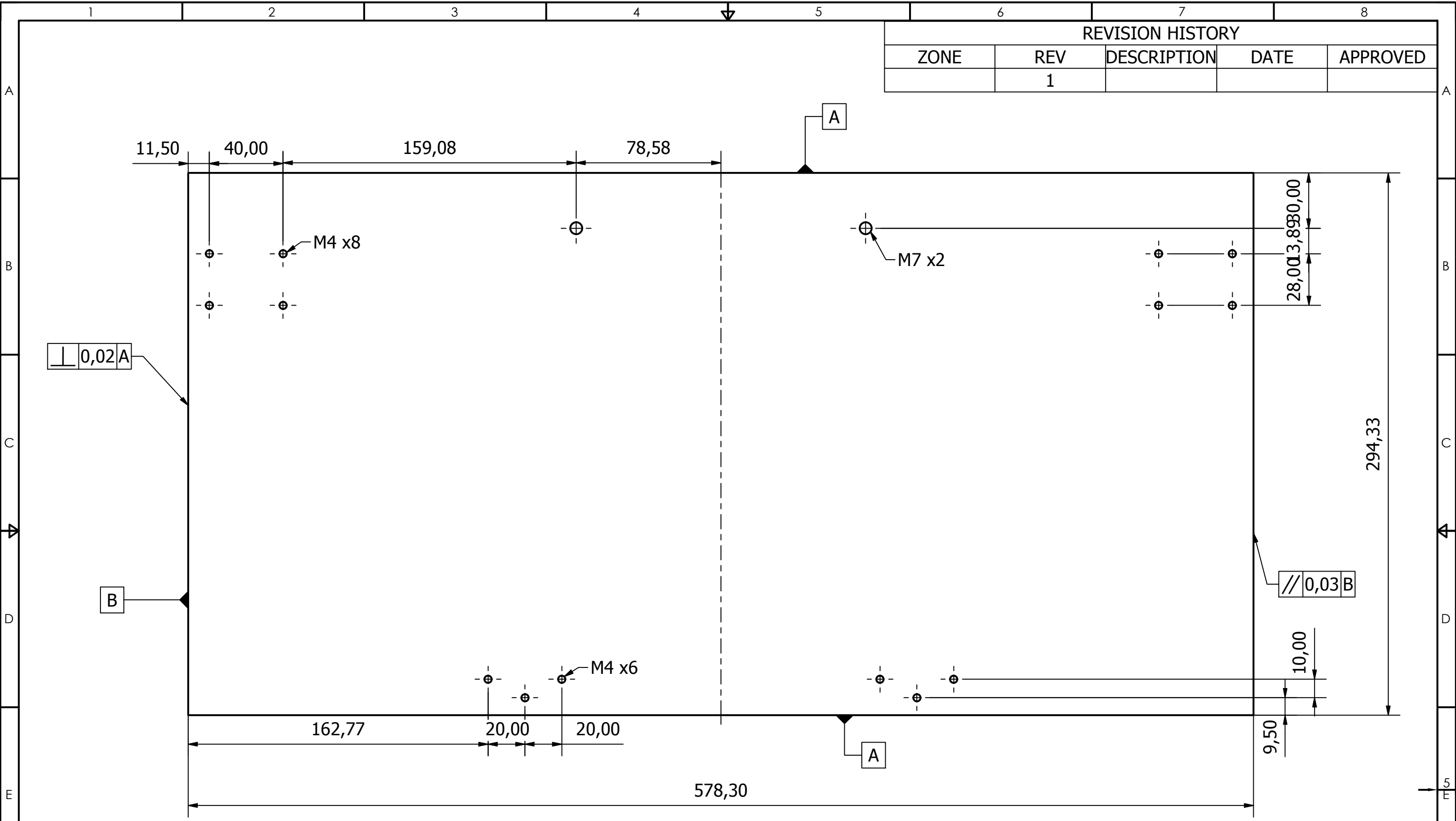
4

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



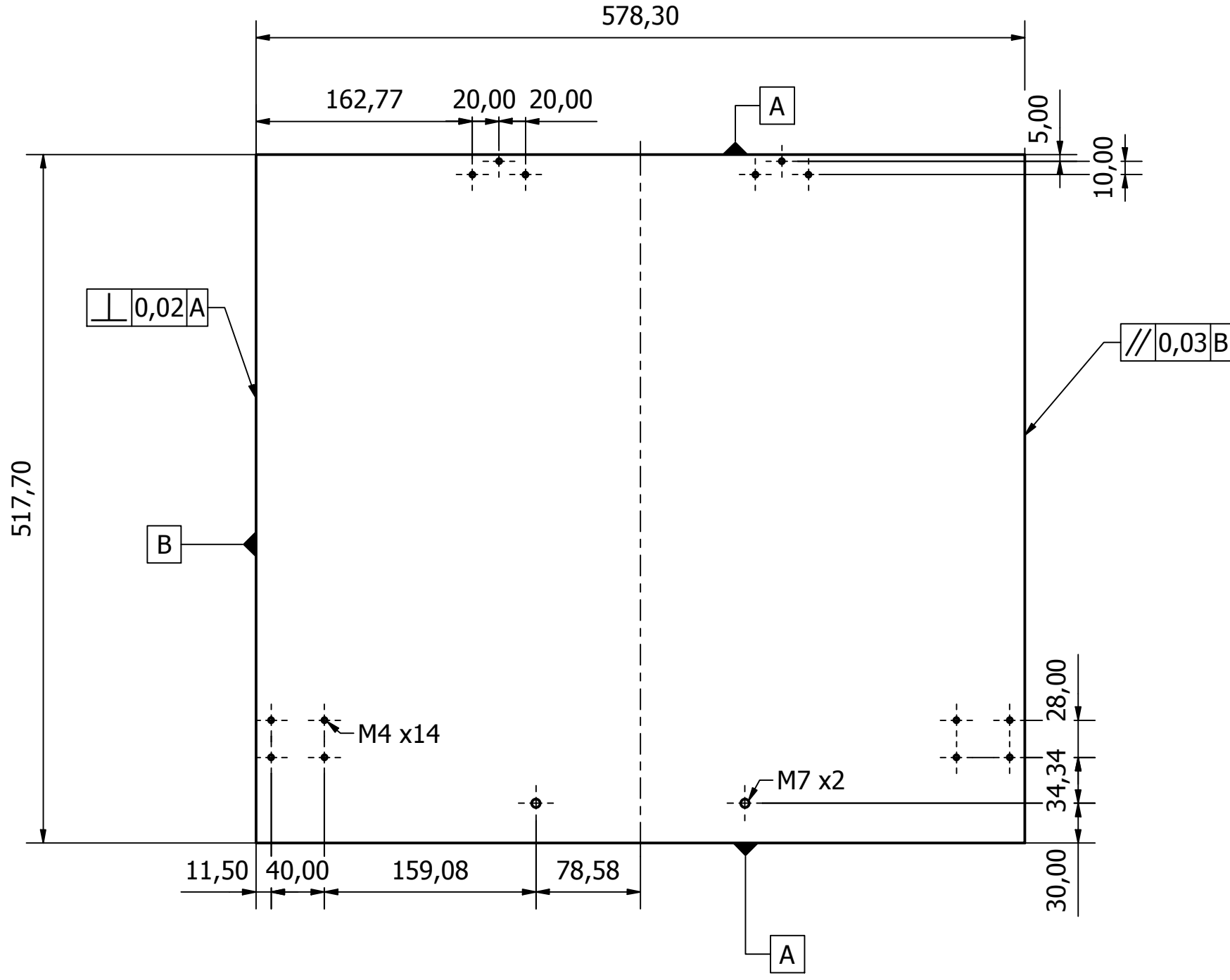
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN	
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1	
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA		FECHA:	03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Base
Diseño:	J. SANCHEZ F			03/05/2021			
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:	Acrílico negro 7 mm		
SISTEMA			Observaciones: Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura		CÓDIGO: JSSFPG0019	ESCALA: 1:4	FORMATO A 3
					UNIDADES: mm	LAMINA: 19/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



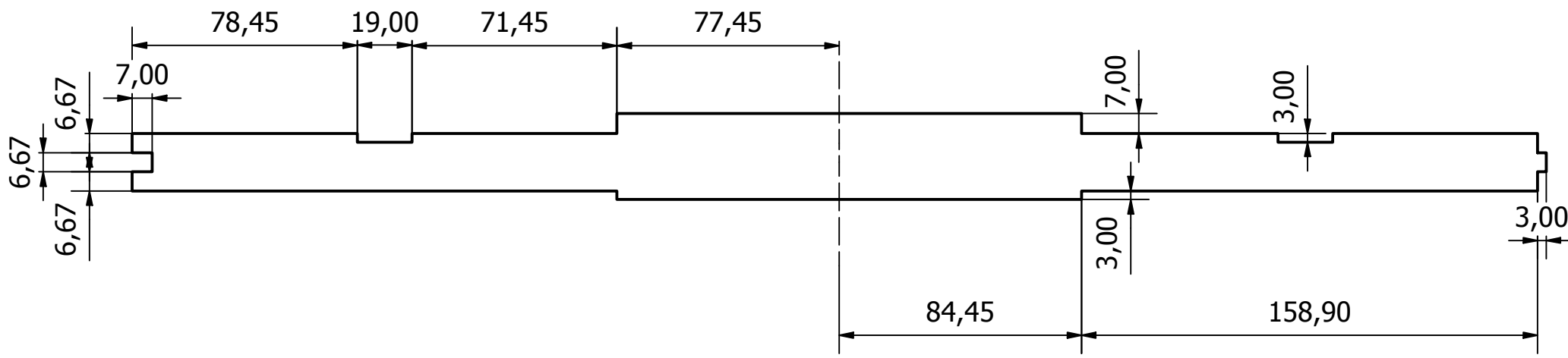
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN Puerta frontal	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7		
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:		
				Acrílico verde		
SISTEMA		Observaciones: Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura			CÓDIGO: JSSFPG0020	FORMATO A 3
					UNIDADES: mm	ESCALA: 1:2 LAMINA: 20/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



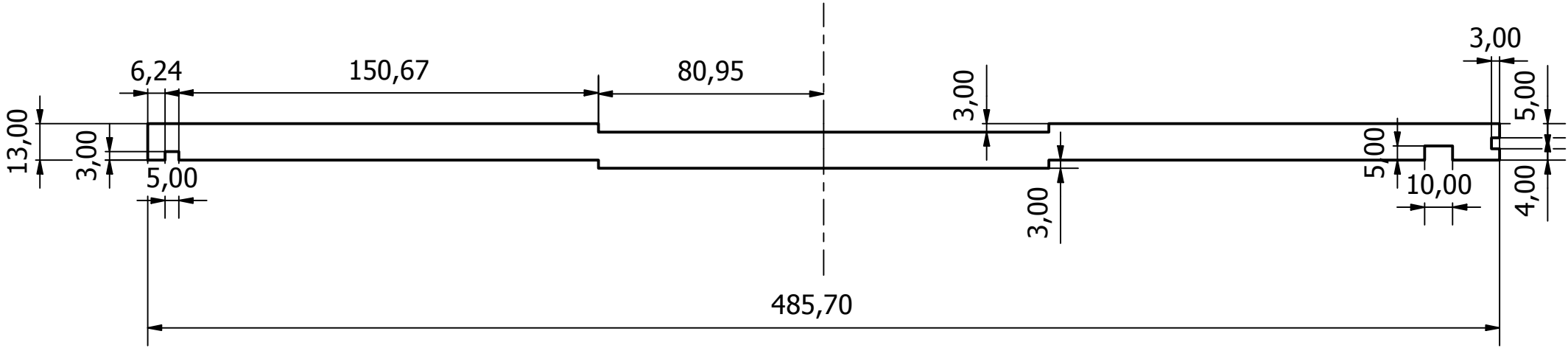
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN Puerta superior	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7		
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:	CÓDIGO: JSSFPG0021	
				Acrílico verde		
SISTEMA	Observaciones: Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura				ESCALA: 1:4	FORMATO A 3
					UNIDADES: mm	LAMINA: 21/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Tapa caja de cables	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: Acrílico negro 3 mm		
Cliente:	HARTMADE			SISTEMA		Observaciones: Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura
CÓDIGO: JSSFPG0022		ESCALA: 1:2		FORMATO A 3		
UNIDADES: mm			LAMINA: 22/32			

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Pared lateral caja de cables	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: Acrílico negro 3 mm		
Cliente:	HARTMADE			SISTEMA		Observaciones: Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura
CÓDIGO: JSSFPG0023		ESCALA: 1:2		FORMATO A 3		
UNIDADES: mm			LAMINA: 23/32			

1

2

3

4

REVISION HISTORY

ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

A

A

B

B

C

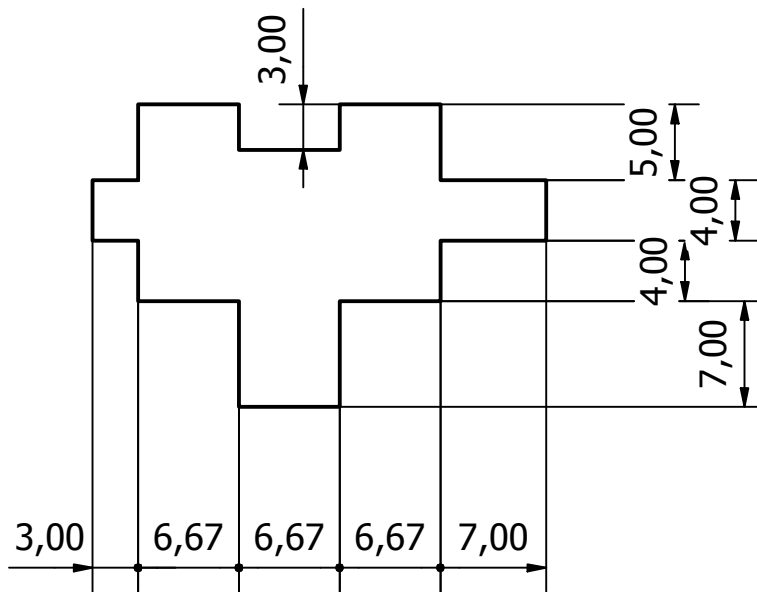
C

D

D

E

E



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: Acrílico negro 3 mm
Cliente:	HARTMADE			

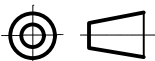
DENOMINACIÓN

Pared frontal caja de cables

F

F

SISTEMA



Observaciones:
Los filetes = de 2 mm
La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura

CÓDIGO:

JSSFPG0024

ESCALA: 2:1

FORMATO

A 4

UNIDADES: mm

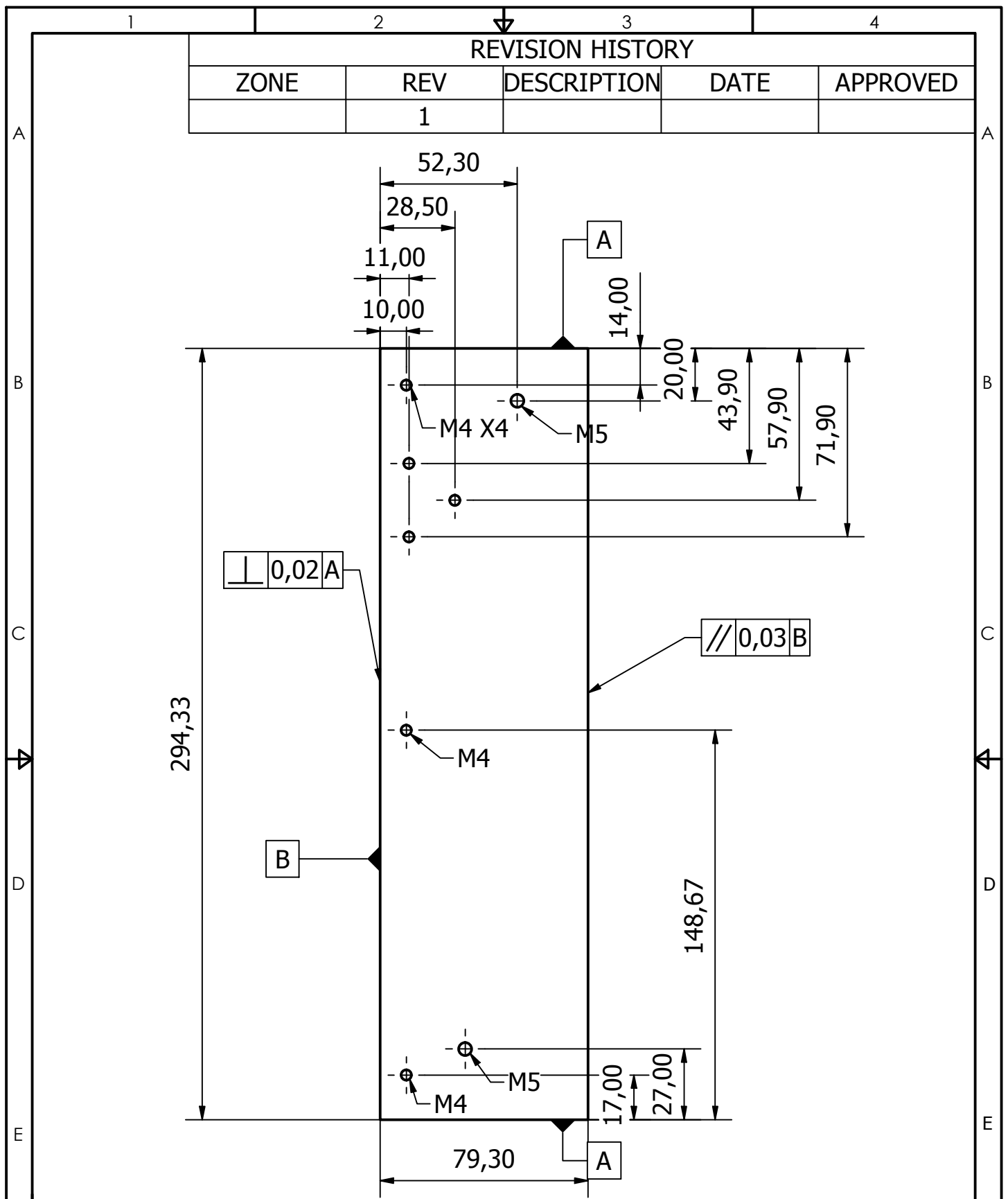
LAMINA: 24/32

1

2

3

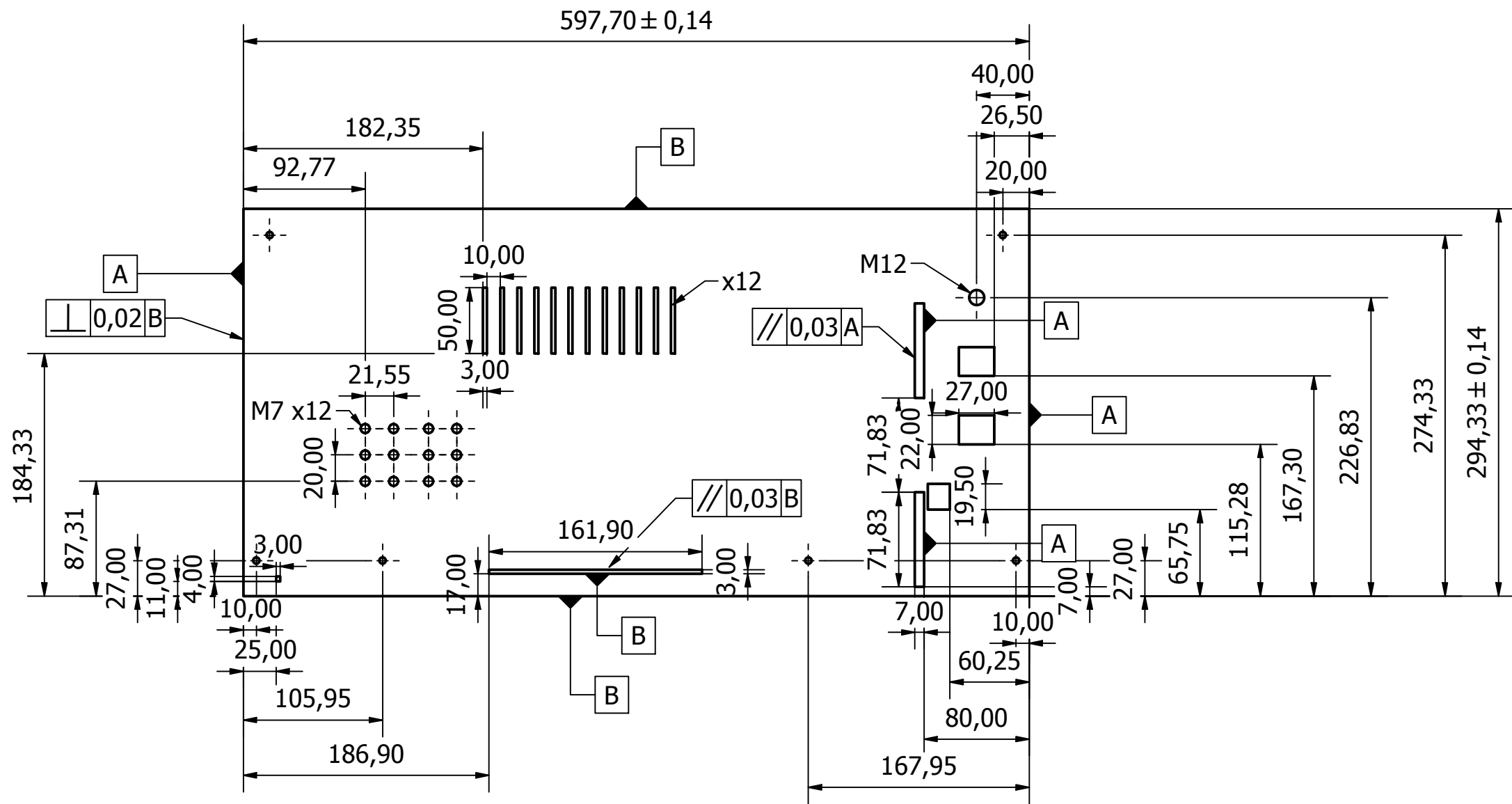
4



REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			

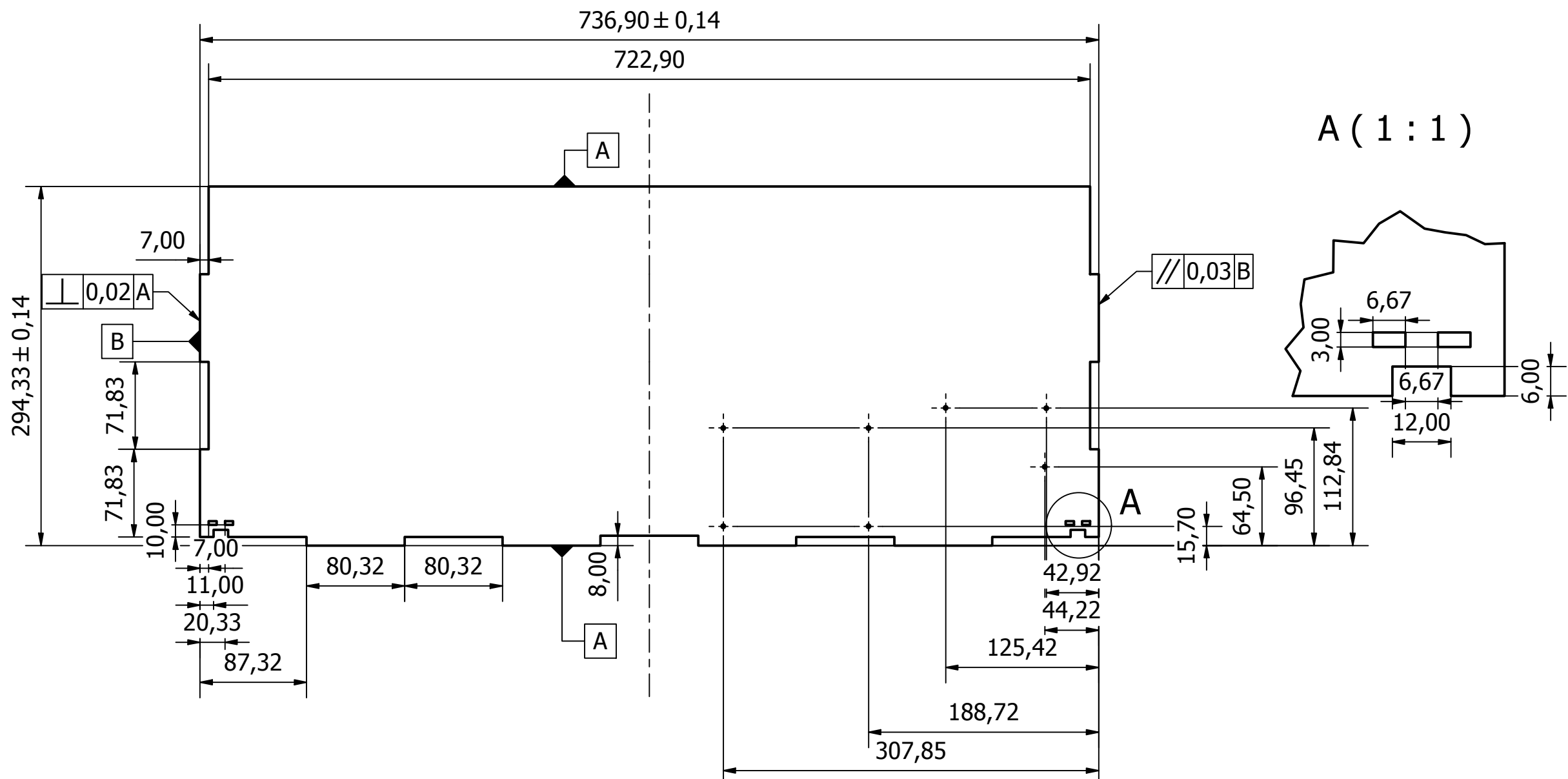
<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN	
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1	
Dibujó:	NOMBRE J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA 03/05/2021	ACABADO GRAL: N7	DENOMINACIÓN Pared frontal de la carcasa		
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: Madera 7 mm			
Cliete:	HARTMADE						
SISTEMA 		Observaciones: Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura			CÓDIGO: JSSFPG0025	ESCALA: 1:2	FORMATO A 4
				UNIDADES: mm		LAMINA: 25/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



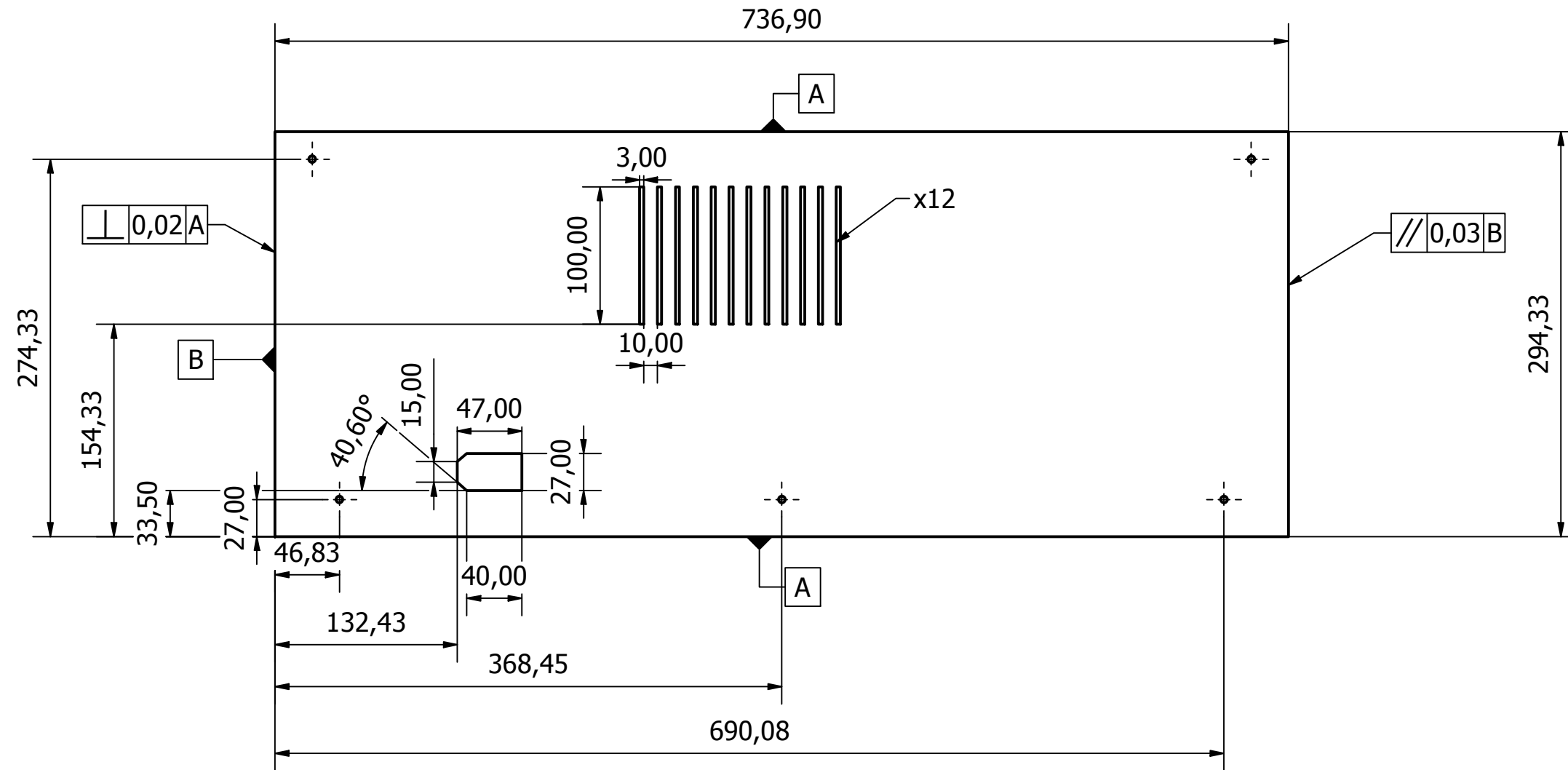
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN Pared lateral izquierda de carcasa	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7		
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:	CÓDIGO: JSSFPG0026	
				Madera 7 mm		
SISTEMA	Observaciones: Los filetes = de 2 mm y los circulos no acotados = M5 La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura				ESCALA: 1:4	FORMATO A 3
					UNIDADES: mm	LAMINA: 26/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



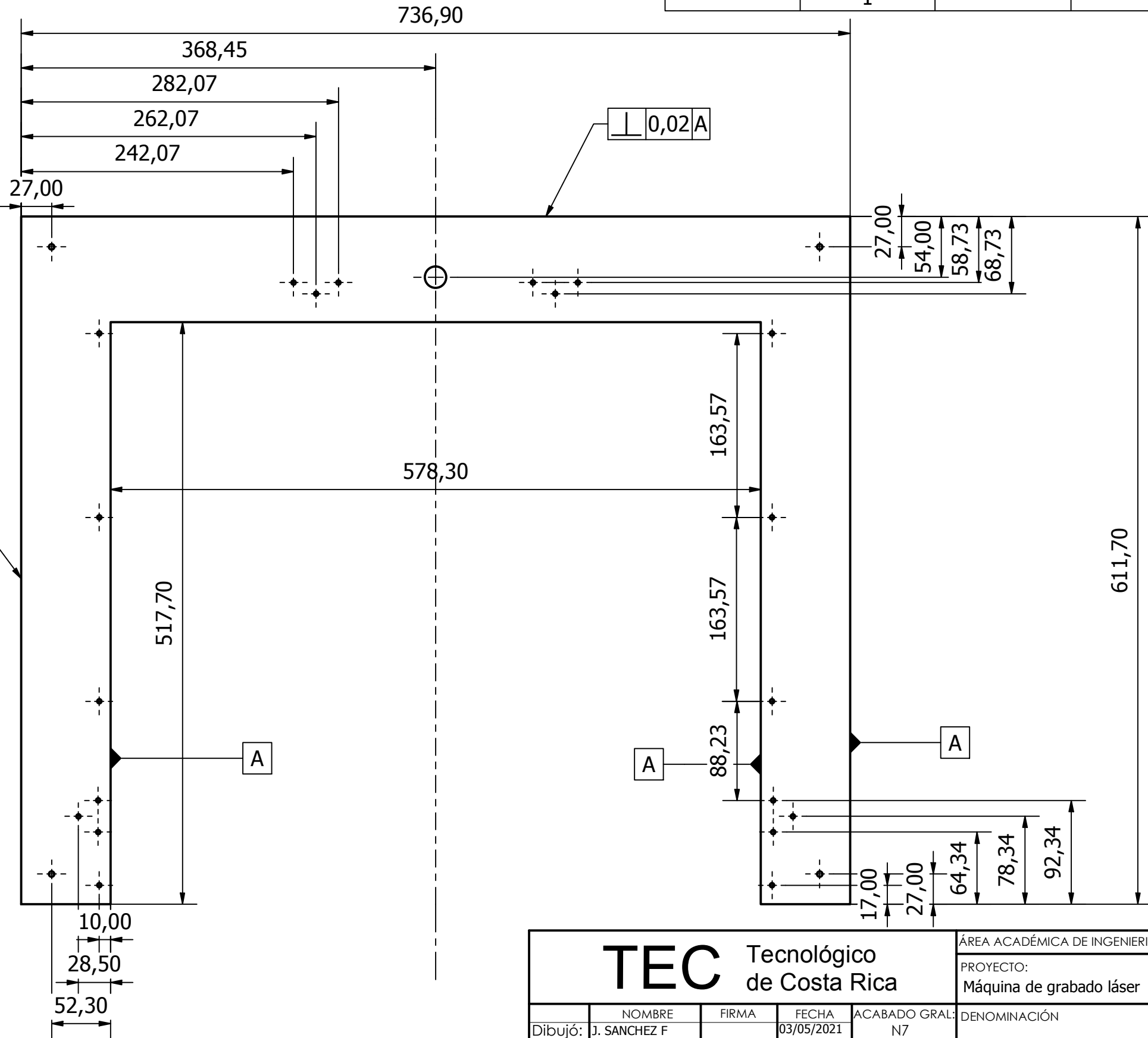
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN	
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1	
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN Pared interna carcasa		
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7			
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:			
				Madera 7 mm			
SISTEMA		Observaciones: Los filetes = de 2 mm y los circulos no acotados = M5 La tolerancia es de ± 0,14 por el mismo metodo de manufactura			CÓDIGO: JSSFPG0028	ESCALA: 1:4	FORMATO A 3
					UNIDADES: mm	LAMINA: 28/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



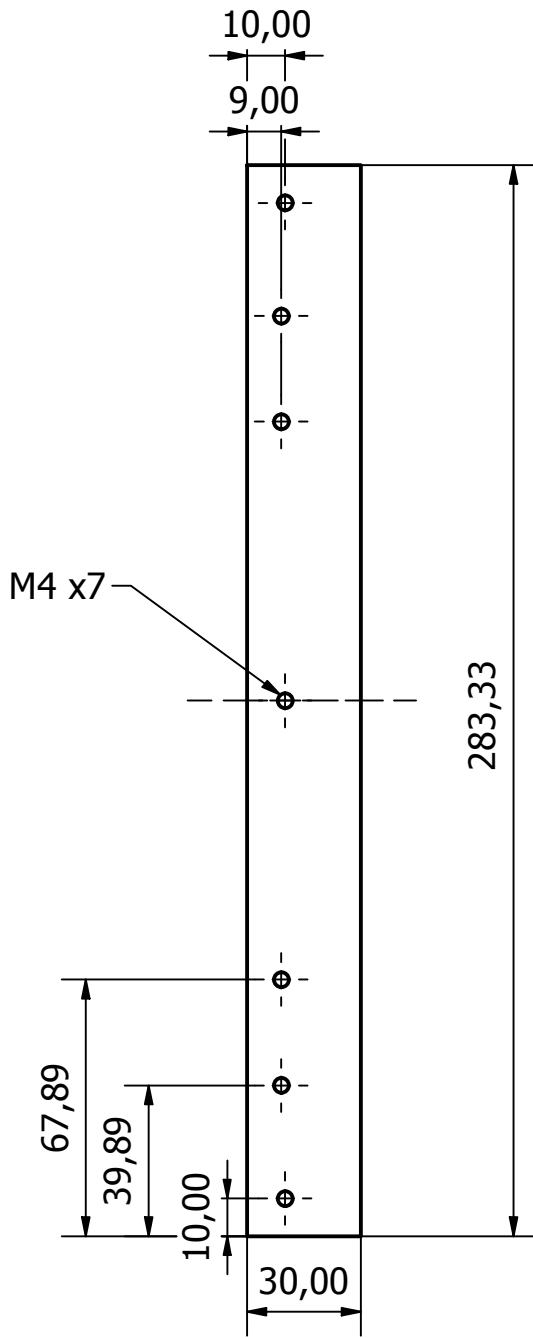
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó:	J. SANCHEZ F	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN Parte trasera de la carcasa	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7		
Cliente:	HARTMADE			MATERIAL:		
				Madera 7mm		
SISTEMA		Observaciones: Los filetes = de 2 mm y los circulos no acotados = M5 La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura		CÓDIGO: JSSFPG0029		FORMATO A 3
				UNIDADES: mm		ESCALA: 1:4 LAMINA: 29/32

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO:		A1
				Máquina de grabado láser		
Dibujó:	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:	DENOMINACIÓN	
Diseño:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7	Tapa de carcasa	
	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:		
Cliente:	HARTMADE			Madera 4mm		
SISTEMA	Observaciones:			CÓDIGO:	ESCALA:	FORMATO
	Los filetes = de 2 mm			JSSFPG0030	1:4	A 3
	La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura			UNIDADES: mm	LAMINA: 30/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

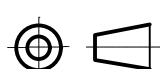
REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

A1

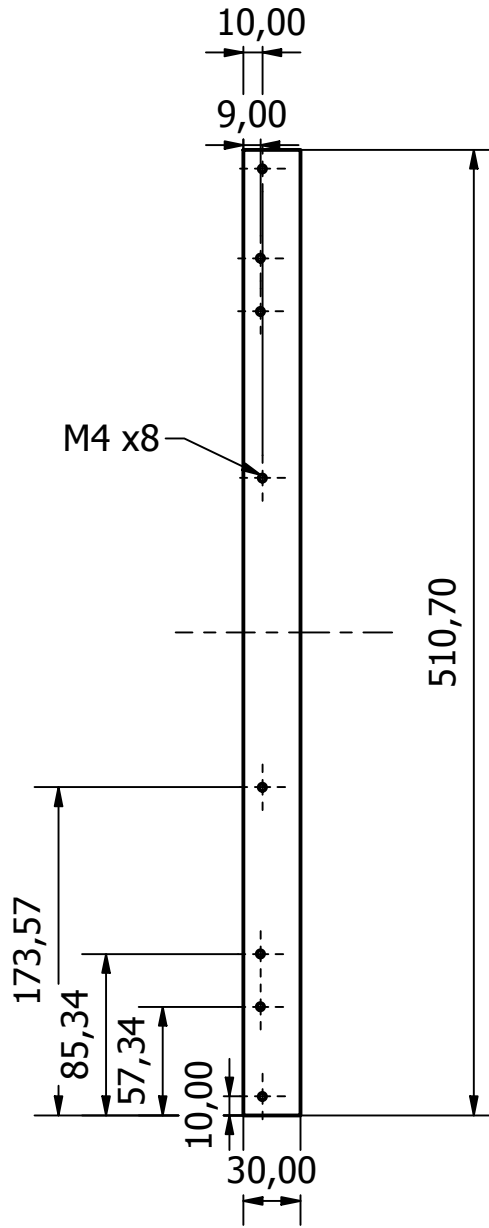
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL:
Cliente:	HARTMADE			Madera 4mm

DENOMINACIÓN
Soporte de tapa frontal

SISTEMA	Observaciones:
	Los filetes = de 2 mm La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura

CÓDIGO:	ESCALA:	FORMATO
JSSFPG0031	1:2	A 4
UNIDADES: mm	LAMINA: 31/32	

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA

REVISIÓN

PROYECTO:
Máquina de grabado láser

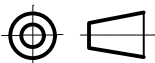
A1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GRAL:
Dibujó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	N7
Diseñó:	J. SANCHEZ F		03/05/2021	MATERIAL: Madera 4 mm
Cliente:	HARTMADE			

DENOMINACIÓN

Soporte tapa superior

SISTEMA



Observaciones:
Los filetes = de 2 mm
La tolerancia es de $\pm 0,14$ por el mismo metodo de manufactura

CÓDIGO:
JSSFPG0032

ESCALA: 1:4

FORMATO

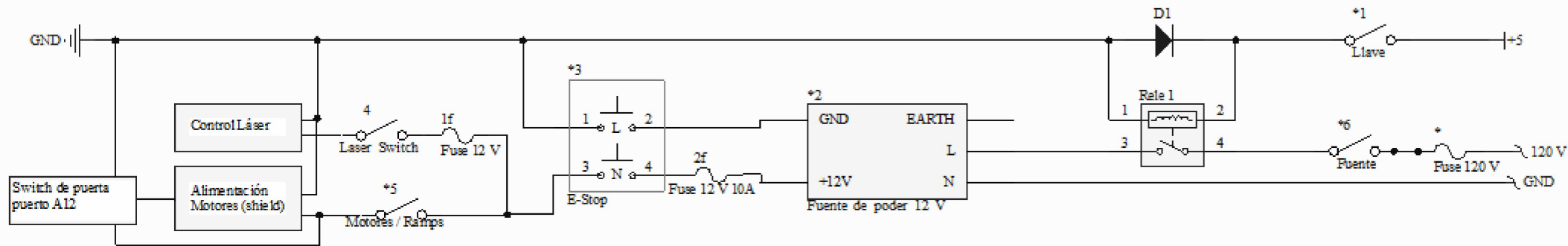
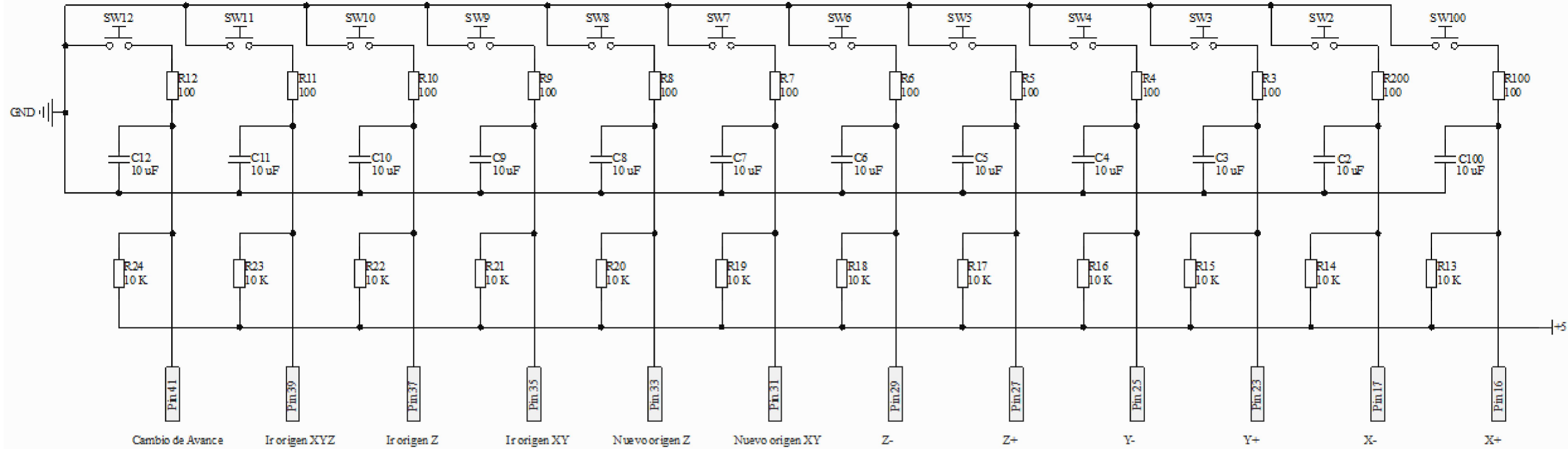
A 4

UNIDADES: mm

LAMINA: 32/32

F. Apéndice F. Plano eléctrico

REVISION HISTORY				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
	1			



<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERIA MECATRÓNICA		REVISIÓN
				PROYECTO: Máquina de grabado láser		A1
Dibujó: J. SANCHEZ F Diseño: J. SANCHEZ F Cliente: HARTMADE				DENOMINACIÓN		<h2>Plano eléctrico</h2>
SISTEMA:				CÓDIGO: JSSFPGE01		
Observaciones:				UNIDADES: mm		ESCALA: - LAMINA: 1/1