UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

DISEÑO DE UNA FRESADORA CNC DE ESCRITORIO DE CABEZALES INTERCAMBIABLES

Trabajo de titulación para
optar al título de
Ingeniero en Fabricación y
Diseño Industrial
Licenciado en Ingeniería

Alumno:
Ignacio Martín Vicencio
Betanzo

Profesor guía:
Sr. Santiago Geywitz Bernal

2020

RESUMEN

KEYWORDS: PROTOTIPADO – FRESADORA – CNC

Este trabajo presenta el diseño de una máquina fresadora cnc de escritorio. Se propone una metodología de diseño basada en distintos autores del área del diseño industrial y mecánico. En cada capítulo se declaran las directrices generales del diseño y los fundamentos que llevaron a tomar las decisiones de diseño de partes o selección de componentes. Todo el proceso se caracteriza por un fuerte sentido de la fabricabilidad de la máquina dentro de un contexto de manufactura individual y de series cortas.

Se obtuvo la documentación necesaria para realizar la construcción de la máquina y un análisis financiero que permite visualizar de manera preliminar su venta en un mercado acotado.

ABSTRACT

KEYWORDS: PROTOTYPING – MILL– CNC

This work presents the design of a desktop cnc milling machine. A design methodology is proposed, based on authors of mechanical and industrial design fields. In each chapter the general design guidelines that rules the process are stated, along with the calculations and data that lead to the definition of parts and selection of components. The overall process is characterized by a strong sense of the manufacturability of the machine within a context of single and short-series fabrication.

The results obtained are the necessary documentation for the construction of the machine (Drawings, Bill of materials, 3D Models) and a financial analysis that allows to preview roughly its commercialization in a specific market.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN **1**

1. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES **3**

1.1. MARCO TEÓRICO **4**
1.1.1. El prototipado 4
1.1.2. Proyecto de impresoras 3D 5
1.1.3. Fabricación estructura 7
1.2. PROBLEMA **11**
1.2.1. Contexto del problema 11
1.2.2. Definición del problema 11
1.2.3. Análisis FODA 11
1.3. COMPRENSIÓN DEL MERCADO **11**
1.3.1. Tipo de usuario 11
1.3.2. Mercado objetivo 11
1.3.3. Competencia 11
1.4. MODELO DE NEGOCIO **12**
1.4.1. Resumen de estrategia 12
1.4.2. Business Model Canvas 12
1.5. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS **13**
1.5.1. Objetivos generales 13
1.5.2. Objetivos específicos 13

2. CAPÍTULO 2: DISEÑO CONCEPTUAL **14**

2.1. NECESIDADES DEL USUARIO **15**
2.1.1. Necesidades 15
2.1.2. Métricas 17
2.2. BENCHMARKING **19**
2.3. ESPECIFICACIONES IDEALES **22**
2.4. ANÁLISIS DE PROBLEMAS **25**
2.4.1. Caja negra de funciones generales 25
2.4.2. Caja negra de subfunciones 25
2.4.3. Problemas a solucionar 26
2.5. BÚSQUEDA EXTERNA **27**
2.5.1. Literatura 27
2.5.2. Benchmarking de conceptos 34
2.6. BÚSQUEDA INTERNA **35**
2.6.1. Lluvia de ideas 35
2.7. ARQUITECTURA **36**
2.7.1. Esquema de producto con elementos funcionales y físicos 36
2.7.2. Esquema de elementos funcionales y físicos agrupados 37
2.7.3. Disposición geométrica aproximada 37
2.7.4. Interacciones fundamentales incidentales 38
2.8. CONCEPTOS **39**
2.9. SELECCIÓN DE CONCEPTO **40**
2.10. DIMENSIONES PRELIMINARES **44**

3. CAPÍTULO 3: DISEÑO DE DETALLES **45**

3.1. FUERZAS **47**
3.1.1. Fuerzas de mecanizado 47
3.1.2. Fuerzas por aceleración 47
3.1.3. Fuerzas de roce 48
3.2. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE **49**
3.3. PARTES ESTANDARIZADAS **52**

3.3.1. Husillo 52
3.3.2. Tornillos sinfín 53
3.3.3. Motores de avance 55
3.3.4. Guías lineales 56
3.3.5. Correas 59
3.3.6. Fuente de poder 61
3.3.7. Cables 62
3.4. PARTES FABRICADAS 63
3.4.1. Estructura 63
3.4.2. Conjunto Brazo Z 78
3.4.3. Mesa 81
3.4.4. Plataforma Carro Transversal 82
3.4.5. Cabezal extrusor 84
3.5. PROCESO DE MANUFACTURA 86
3.5.1. Definición de las tareas 86
3.5.2. Estimación de tiempos de manufactura 93
3.5.3. Diagrama PERT 93
3.6. COSTOS DE MANUFACTURA 96
3.6.1. Insumos 96
3.6.2. Costos fijos 98
3.6.3. Maquinaria 99
3.6.4. Herramientas 99
3.6.5. Costos variables 100
3.6.6. Precio de venta 101

4. CAPÍTULO 4: ANÁLISIS FINANCIERO 102

4.1. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA 103
4.2. VIABILIDAD DEL PROYECTO COMO NEGOCIO 107
4.2.1. Análisis de sensibilidad 108

CONCLUSIONES 109

BIBLIOGRAFÍA 110

ANEXO A: IMPRESORA PRISMA UNO 111
ANEXO B: CÁLCULOS DE FUERZAS 112
ANEXO C: DESARROLLO DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE 113
ANEXO D: PLANO BRAZO Z 114
ANEXO E: PLANO PLATAFORMA Z 115
ANEXO F: PLANO REFUERZO Z 116
ANEXO G: PLANO MESA 117
ANEXO H: PLANO CARRO TRANSVERSAL 118
ANEXO I: SOLDADURA 119
ANEXO J: PLEGADO PARTES A Y B 120
ANEXO K: RECTIFICADO DE LA ESTRUCTURA 124
ANEXO L: PROGRAMA DE PLANEADO CNC 125
ANEXO M: INSTRUCCIONES DE ENSAMBLAJE 126
ANEXO N: DIBUJO MÁQUINA "PRISMA CNC" 136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 0-1. Fresadora "Prisma CNC" (Desarrollada en este trabajo) 1
Figura 0-2. Impresora 3D "Prisma UNO" (diseñada previamente) 1
Figura 1-1. Prototipo de carcasa inteligente para móvil que integra partes impresas en 3D y partes mecanizadas en aluminio 5
Figura 1-2. Primer prototipo Prisma UNO. 5
Figura 1-3. Segundo prototipo Prisma UNO. 6
Figura 1-4. Modelo impreso en material flexible mediante impresión dual en impresora Prisma UNO 6
Figura 1-5. Plataformas, soporte de motor y columna parte A y B cortadas en Acero A36 de 5mm de espesor. 7
Figura 1-6. Componentes de la estructura listos para el proceso de soldadura. 8
Figura 1-7. Proceso de desbaste (a la izquierda) y proceso de soldadura (derecha). 8
Figura 1-8. Alineación para mecanizar la pieza Soporte de riel MGN. 9
Figura 1-9. Visualización de una nueva idea de soportes. 9
Figura 1-10. Montaje de la estructura al interior del centro de mecanizado CNC en el taller DIMA de la universidad. 10
Figura 1-11. Estructura soldada y rectificada. 10
Figura 1-12. Lienzo de modelo de negocio. 12
Figura 2-1. Caja negra de funciones generales. 25
Figura 2-2. Caja negra de subfunciones. 25
Figura 2-3. Funciones más relevantes. 26
Figura 2-4. Fijaciones mediante pernos. 27
Figura 2-5. Tipos de mordazas de acción rápida, también llamadas prensas de liberación rápida. 28
Figura 2-6. Mordaza deslizante. 28
Figura 2-7. Acople o mordaza de abrazadera. 29
Figura 2-8. Plataforma con surcos en T o "T-Slots" 29
Figura 2-9. Tuercas para ranuras en T. 30
Figura 2-10. Plataforma perforada con elementos de fijación. 30
Figura 2-11. Brida con bloque de apoyo escalonado. 31
Figura 2-12. Elementos para bridas de sujeción. 31
Figura 2-13. "Toe-Clamp" 32
Figura 2-14. Geometría de coordenadas cartesianas 32
Figura 2-15. Sistema de desplazamiento XY 33
Figura 2-16. Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sinfín 33
Figura 2-17. Esquema de elementos físicos y funcionales del producto 36
Figura 2-18. Esquema de elementos físico y funcionales agrupados 37
Figura 2-19. Disposición geométrica aproximada perspectiva 37
Figura 2-20. Disposición geométrica aproximada vista lateral 38
Figura 2-21. Interacciones fundamentales incidentales 38
Figura 2-22. Concepto A 39
Figura 2-23. Concepto B 39
Figura 2-24. Concepto C 39
Figura 2-25. Concepto D 40
Figura 2-26. Concepto de diseño de la máquina 44
Figura 3-1. Proceso de diseño de detalles simplificado mostrando los hitos más notables. 46
Figura 3-2. Diagrama de cuerpo libre simplificado 49
Figura 3-3. Diagrama de cuerpo libre plataforma Z 50
Figura 3-4. Diagrama de cuerpo libre Carro transversal 50
Figura 3-5. Husillo de 500W con porta herramienta y pieza de acople 53
Figura 3-6. Juego de transmisión SFU compuesta por diversos elementos 53
Figura 3-7. Especificaciones dimensionales tornillo SFU1204 54
Figura 3-8. Riel MGN 57
Figura 3-9. Correas 59
Figura 3-10. Polea dentada 59
Figura 3-11. Distancia entre centro de las poleas 60
Figura 3-12. Correa 60
Figura 3-13. Izquieda: Fuente de poder LED 350W, derecha: Fuente de poder "Spindle" 61
Figura 3-14. Diagrama de rutas de cables eléctricos 62

Figura 3-15. Render de la estructura 63
Figura 3-16. Dimensiones generales estructura 64
Figura 3-17. Análisis estático 67
Figura 3-18. Análisis de modos "Brazo no reforzado" 69
Figura 3-19. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 1: Modo 3 70
Figura 3-20. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 1: Modo 4 71
Figura 3-21. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 1: Modo 5 71
Figura 3-22. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 2: Modo 4 72
Figura 3-23. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 2: Modo 5 73
Figura 3-24. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 2: Modo 6 73
Figura 3-25. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 3: Modo 5 74
Figura 3-26. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 3: Modo 6 75
Figura 3-27. Arriostramientos estructurales 76
Figura 3-28. Conjunto Brazo 78
Figura 3-29. Despiece conjunto Brazo 79
Figura 3-30. Dimensiones generales Conjunto Brazo 80
Figura 3-31. Mesa 81
Figura 3-32. Dimensiones generales Mesa 81
Figura 3-33. Plataforma Carro Transversal 82
Figura 3-34. Dimensiones generales Plataforma Carro Transversal 82
Figura 3-35. Disposición y componentes Plataforma Carro Transversal 83
Figura 3-36. Cabezal extrusor. 84
Figura 3-37. Despiece Cabezal extrusor 85
Figura 3-38. Dimensiones generales Cabezal extrusor 86
Figura 3-39. Dimensiones Soportes de riel MGN. 86
Figura 3-40. Chaflán Soportes de riel MGN. 87
Figura 3-41. Desbaste de la pieza Columna. 87
Figura 3-42. Parte de las especificaciones de soldadura estructura. 88
Figura 3-43. Render de soldadura en la estructura. 88
Figura 3-44. Superficies a rectificar. 89
Figura 3-45. Cercanía de la Estructura montada al interior del centro de mecanizado con el carrusel porta-herramientas. 90
Figura 3-46. Pinza del carrusel rota al colisionar el barrote de la herramienta adyacente. 90
Figura 3-47. Montaje de la Estructura sobre una prensa para rectificar plano YZ. 91
Figura 3-48. Montaje de la Estructura mediante bridas para rectificar plano XY. 92
Figura 3-49. Diagrama PERT 95
Figura 4-1. Actividades económicas de Chile 104
Figura 4-2. Actividades económicas de México 104
Figura 4-3. Actividades económicas de Argentina 105
Figura 4-4. Actividades económicas de Brasil 105
Figura 4-5. Mercado total estimado. 106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Necesidades del usuario 15
Tabla 2-2. Métricas. 17
Tabla 2-3. Análisis de Benchmarking basado en métricas. 19
Tabla 2-4. Especificaciones ideales del producto. 22
Tabla 2-5. Análisis de benchmarking de conceptos 34
Tabla 2-6. Lluvia de ideas. 35
Tabla 2-7. Matriz de selección de concepto de acople 41
Tabla 2-8. Matriz de selección concepto de estructura 42
Tabla 2-9. Matriz de selección de concepto de aseguramiento de material 43
Tabla 3-1. Dimensiones de la máquina 57
Tabla 3-2. Fuerzas de reacción 58
Tabla 3-3. Dimensiones y cargas máximas recomendadas para rieles MGN 58
Tabla 3-4. Calibres AWG según ruta 62
Tabla 3-5. Comparación de alternativas conceptuales 66
Tabla 3-6. Estimación de tiempos de manufactura 93
Tabla 3-7. Tabla de tareas para diagrama PERT 94
Tabla 3-8. Lista de partes fabricadas al por menor y al por mayor 96
Tabla 3-9. Lista de partes estandarizadas al por menor y al por mayor 97
Tabla 3-10. Costos fijos. 98
Tabla 3-11. Costos de máquinas 99
Tabla 3-12. Costos de herramientas 99
Tabla 3-13. Costos de manufactura 100
Tabla 3-14. Precio por unidad, al por mayor y de venta 101
Tabla 4-1. Flujo de caja del proyecto con subsidio Corfo Mipyme 108
Tabla 4-2. Ingresos vs VAN-TIR 108

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1. Torque vs velocidad para motores Nema 23 56
Gráfico 3-2. Análisis de respuesta de frecuencia 1. Condición "Brazo no reforzado" 70
Gráfico 3-3. Análisis de respuesta de frecuencia 2. Condición "Brazo reforzado" 72
Gráfico 3-4. Análisis de respuesta de frecuencia 3. Condición "Múltiples partes reforzadas" 74
Gráfico 3-5. Estructura reforzada con arriostramientos vs no reforzada 75
Gráfico 3-6. Análisis de respuesta de frecuencia 4. Condición "Múltiples partes reforzadas sin arriostramientos y anclada al piso" 76
Gráfico 3-7. Análisis de respuesta de frecuencia 4. Condición "Múltiples partes reforzadas sin arriostramientos y anclada al piso", escala ajustada 77
Gráfico 3-8. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 4: Modo 1 77
Gráfico 3-9. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 4: Modo 2 78

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

DIY	: Hágalo Usted Mismo
SFU	: Unidad de una sola brida
NEMA	: Asociación Nacional de Manufactureros Eléctricos
CNC	: Control Numérico por Computador
DIMA	: Departamento de Diseño y Manufactura
FDM	: Manufactura por Deposición Fundida
PIB PPP	: Producto Interno Bruto según poder de paridad de compra
rev	: Revoluciones

B. SIMBOLOGÍA

CLP	: Peso Chileno
USD	: Dólar Estadounidense
RPM	: Revoluciones por minuto
mm	: Milímetro
m	: Metro
s	: Segundo
N	: Newton
kN	: Kilo Newton
kg	: Kilógramo
F	: Fuerza
$\emptyset$	: Diámetro de la fresa
t	: Profundidad de corte
f	: Avance o alimentación
v	: Velocidad de corte
K	: Resistencia específica del acero
K	: $a \bullet \sigma_k$
a	: Factor de fuerza de corte a (Ver Anexo B)
σ_k	: Resistencia a la tensión (ver Anexo B)
P	: Potencia
T_R	: Torque
n	: Revoluciones por minuto
Rad	: Radián
Min	: Minuto
ω	: Velocidad angular
W	: Watt
Ncm	: Newton centímetro

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es documentar el proceso de diseño de una pequeña máquina fresadora CNC de escritorio (Ver figura 0-1), a fin de entregar una metodología de diseño que pueda complementar desarrollos similares y, también, entregar la documentación necesaria para fabricar esta máquina (Ver Anexos al final de este trabajo).

Este trabajo nace, además, como una manera de condensar la experiencia y ampliar el proyecto "Prisma", el cual tiene por objetivo la construcción de máquinas de prototipado pequeñas, destinadas al uso en establecimientos académicos de sectores vulberables (Ver figura 0-2).

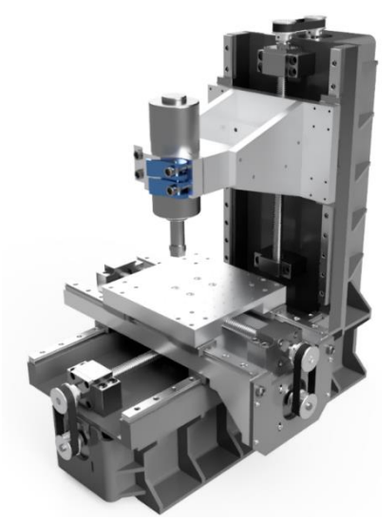
Una de las mayores consideraciones que se tuvo al escribir este trabajo, fue establecer un orden cronológico en su desarrollo. La idea fue ordenar los capítulos y todas sus partes mediante un razonamiento deductivo, que permita al lector avanzar en el proceso de diseño de manera secuencial e intuitiva.

Lamentablemente, esto no es siempre posible ya que, como aparece en el libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley;

"No existe una secuencia precisa de pasos para algún proceso de diseño. Por naturaleza, el diseño es un proceso iterativo (...) Algunas veces las decisiones se toman de manera tentativa, por lo cual es conveniente reservarse el derecho de hacer ajustes a medida que se obtengan más datos."

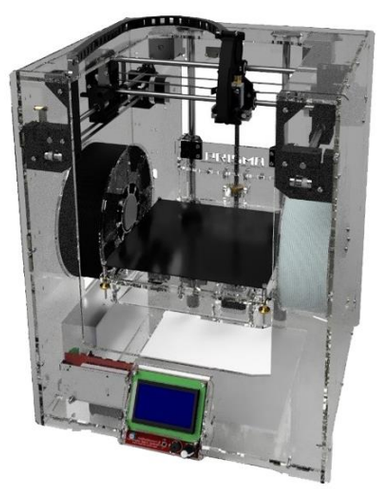
Por lo anterior, se entenderá que algunos puntos en el diseño, específicamente en la sección de diseño de detalles, el diseño documentado no siempre corresponderá a la inherente realidad caótica del proceso de diseño, lo cual puede verse reflejado en algunas inconsistencias de orden o faltas de argumentos deductivos.

Finalmente, cabe mencionar que este trabajo se enmarca dentro del proceso de trabajo de titulación de la universidad, por lo cual debe obedecer a algunos requerimientos específicos, como por ejemplo que el objeto en diseño debe ser parte de un negocio y por consiguiente se debe estudiar la factibilidad de su introducción en un mercado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-1. Fresadora "Prisma CNC" (Desarrollada en este trabajo)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 0-2. Impresora 3D "Prisma UNO" (diseñada previamente)

1. CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1. El prototipado

No es sencillo circunscribir el concepto de prototipado – la acción de crear un prototipo – bajo una definición única o estándar, dado que muchas veces el prototipo sirve distintas funciones según el propósito, área o industria para el que fue concebido. En este sentido, podemos distinguir clasificaciones según su dimensión material (prototipos físicos o analíticos), de escala (prototipos comprehensivos o acotados) o bien de acuerdo con su propósito final (prototipos de aprendizaje, comunicación, integración o como hitos de avance de un proyecto). La literatura disponible no es concluyente, por lo que es conveniente analizar la definición de prototipado de acuerdo con su contexto particular (L. Jensen, 2016).

En el caso que a este trabajo compete, y a grandes rasgos, el prototipado puede ser entendido como una actividad que consiste en fabricar objetos, previo a su producción industrial, para estudiar su comportamiento al menor costo posible (Thompson, 2011). Es una actividad transversal a muchas industrias que tienen que ver con la fabricación de bienes de consumo y algunos servicios. El prototipado no es una actividad propia de ciertas industrias en específico, sino, una función propia del desarrollo del diseño e ingeniería conceptual en alguna actividad económica. Sin embargo, se observa que es mucho más intensivo en algunos sectores que otros.

La industria de la manufactura agrupa a las principales actividades económicas que utilizan el prototipado dentro de sus procesos productivos. En la academia, por otro lado, se realizan actividades de prototipado cada vez que se desarrolla una idea conceptual a objeto físico, ya que el objetivo final es el estudio del objeto y no la producción masiva. En palabras simples, el prototipado está fuertemente relacionado con el desarrollo inicial de un producto (Ullman, 2010).

Cecilia Ramírez (2010), en su artículo "Propuestas Metodológicas para el desarrollo de productos", propone 12 etapas para el desarrollo industrial de un producto, desde su concepción hasta el reciclado. Ahí se presenta la fase de desarrollo formal del producto como el punto en el cual el producto es creado y prototipado. Así, los diseñadores pueden explorar alternativas de diseño, focalizando los esfuerzos en resolver problemáticas relativas a configuración externa del producto, como confort, legibilidad y seguridad, organización y configuración interna de partes, distribución, interacciones y funciones. Se menciona, además, la importancia de la utilización de herramientas de diseño digital (CAD), las que permiten simular el producto de forma virtual previo a su prototipado. Estas herramientas permiten, además, la comunicación con máquinas automatizadas (CNC), utilizadas para la fabricación del producto o prototipo mediante software de asistencia a la manufactura (CAM).
Algunos procesos utilizan máquinas que fabrican partes o productos sin necesitar costosas herramientas o dispositivos anexos específicos, como, por ejemplo, corte láser, mecanizado CNC o tratamientos con aerosol.

Por otro lado, hay ciertos productos que necesitan procesos productivos específicos de alto costo, como inyección de plástico, estampado con matrices, fundición, etc. Estas piezas pueden ser prototipadas utilizando procesos alternativos, dentro de los cuales se destaca la manufactura aditiva, también llamada prototipado rápido, realizado normalmente por las - comúnmente llamadas - impresoras 3D (ver figura 1-1). Algunas desventajas de este proceso alternativo suelen ser la obtención de acabados superficiales distintos al deseado, diferentes materialidades disponibles o resistencias obtenidas.

En el presente trabajo, el diseño de la máquina supone una combinación o intercambiabilidad de funciones entre máquinas herramientas y procesos de fabricación (mecanizado CNC y manufactura aditiva), y su fabricación contempla, a su vez, el uso de diversos tipos de procesos de fabricación, en particular, corte láser en metal, mecanizado, soldadura, plegado, arenado y pintado.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-1. Prototipo de carcasa inteligente para móvil que integra partes impresas en 3D y partes mecanizadas en aluminio

1.1.2. Proyecto de impresoras 3D

Este proyecto, motivado por el interés del autor en la fabricación de prototipos en el ámbito académico, logró diseñar y construir una impresora 3D (Ver: ANEXO A:) capaz de competir en cuanto a calidad de impresión con máquinas de la misma gama disponibles en el mercado, obteniendo planos de fabricación y ensamblaje para su replicación.

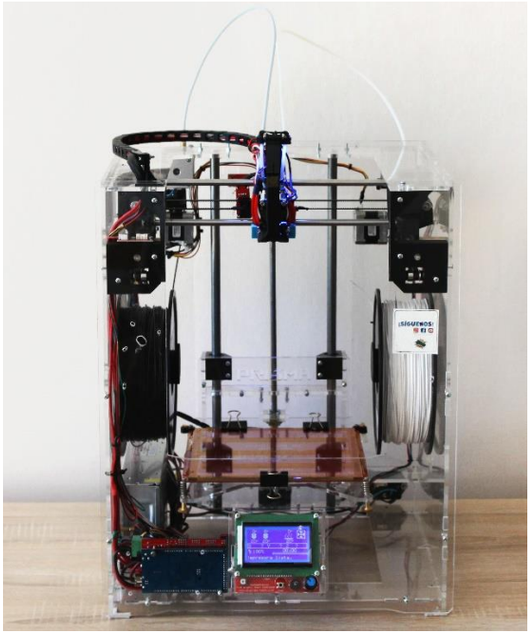
El proyecto, además del diseño y construcción, incluyó diversas pruebas, extenso uso de estas, evaluación e incluso visitas a terreno en distintos FabLabs.

A modo de resumen, se pueden reunir algunas de las conclusiones más relevantes obtenidas del proyecto, respecto al ámbito de prototipado rápido:

1) Se puede lograr una alta calidad de producto sin comprometer los costos de manera excesiva
2) La externalización de procesos específicos al extranjero suele ser la alternativa más conveniente en Chile.
3) El mercado profesional está dispuesto a no escatimar en gastos si el producto ofrece confiabilidad y versatilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-2. Primer prototipo Prisma UNO.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-3. Segundo prototipo Prisma UNO.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-4. Modelo impreso en material flexible mediante impresión dual en impresora Prisma UNO

1.1.3. Fabricación estructura

El presente trabajo contempla la fabricación de un prototipo, el cual no llegó a concluirse completamente debido a situaciones de fuerza mayor.

Sin embargo, la experiencia obtenida tiene un gran valor que impactó de manera fundamental en la realización de todo el proceso de este trabajo. Además, se cuenta con algunos registros del desarrollo de la estructura principal.

A continuación, se expone, en orden cronológico, el desarrollo logrado de la pieza estructura:

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-5. Plataformas, soporte de motor y columna parte A y B cortadas en Acero A36 de 5mm de espesor.

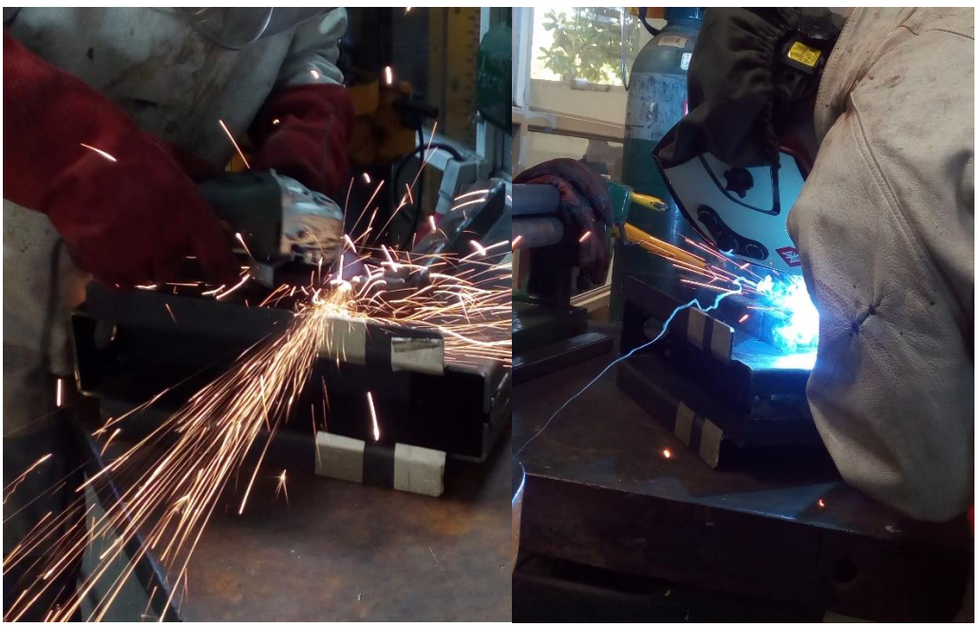
Piezas A y B de la columna junto con plataformas y refuerzos. Algunos de los refuerzos se eliminaron posteriormente del diseño al comprobarse por análisis FEA que no son apropiados y remplazándose por otros que no aparecen en la imagen. Es importante destacar que con la pieza columna no se logró la precisión esperada. Las pestañas tienen una desviación de hasta 1 grado y las pestañas traseras no fueron plegadas correctamente por la empresa. Además, cabe mencionar que la parte B tuvo que ser fabricada más de una vez por errores en el plegado. La conclusión de esto es que:

1) El plegado es un proceso con poca precisión para esta geometría y requerimiento.
2) El proceso de plegado requiere de entregar instrucciones muy claras ya que no es una geometría trivial como podría parecer a simple vista.

Dentro de este trabajo, la fabricación de la estructura significó un aporte significativo al diseño de la máquina, ya que permitió dar cuenta de ciertos aspectos de diseño que debían ser mejorados.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-6. Componentes de la estructura listos para el proceso de soldadura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-7. Proceso de desbaste (a la izquierda) y proceso de soldadura (derecha).

Un aspecto mejorado fueron los soportes de los rieles MGN. En un principio, el diseño tenía previsto la fabricación de dichos soportes mediante un proceso de mecanizado exclusivo, pensando en un manejo más cómodo del componente. Sin embargo, luego de la fabricación de la pieza, se descubrió que se podía agilizar el proceso y permitir un ensamble más preciso de los componentes si se soldaban y se mecanizaba todo junto. En la figura 1-8 se puede ver el intento de mecanizar un soporte de forma independiente. La figura 1-9 muestra el primer acercamiento de la idea de soldar los soportes antes de mecanizar. Nótese que los planos XY, YZ están rectificados innecesariamente.

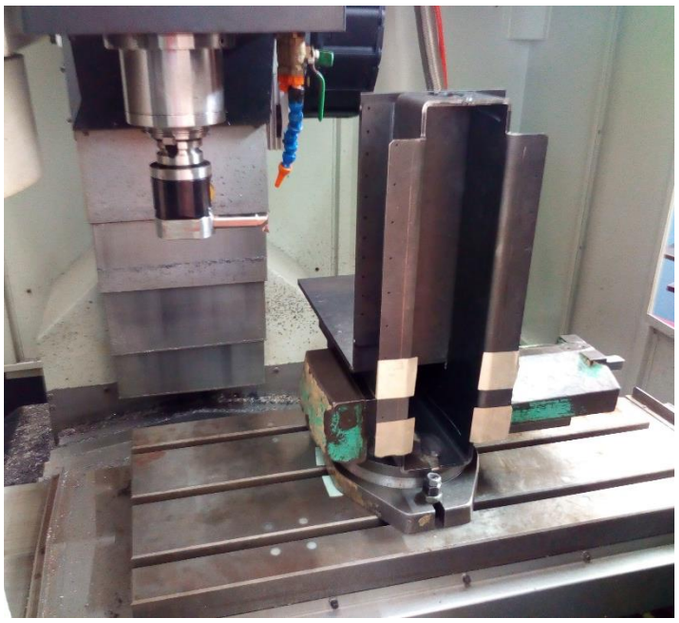
La experiencia permitió concluir con un cambio de diseño que elimina todos los procesos anteriores para condensarlos en uno solo.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-8. Alineación para mecanizar la pieza Soporte de riel MGN.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-9. Visualización de una nueva idea de soportes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-10. Montaje de la estructura al interior del centro de mecanizado CNC en el taller DIMA de la universidad.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-11. Estructura soldada y rectificada.

1.2. PROBLEMA

1.2.1. Contexto del problema

Actualmente existen en el mercado una gran variedad de equipos de prototipado, cada uno especializado en un proceso específico. El prototipado requiere la fabricación de objetos que muchas veces necesitan más de un proceso en su fabricación. Esto obliga a los usuarios a adquirir más de una máquina para realizar un proceso de prototipado.

1.2.2. Definición del problema

No existen alternativas efectivas y de bajo costo para establecer cadenas de fabricación de prototipos que requieran procesos de arranque de viruta y manufactura por adición láser.

1.2.3. Análisis FODA

Fortalezas:
- Conocimiento técnico de procesos de manufactura y prototipado

Debilidades:
- No existe un estudio exhaustivo del mercado objetivo

Oportunidades:
- Aumento sostenido en el mercado de equipos de prototipado rápido en Chile y el mundo.

Amenazas
- Existencia de productos similares

1.3. COMPRENSIÓN DEL MERCADO

1.3.1. Tipo de usuario

El usuario objetivo se identifica como usuario DIY o "Hágalo usted mismo", por sus siglas en inglés "Do It Yourself".

Este usuario se caracteriza por realizar actividades que involucran la creación de objetos, ya sea mediante la fabricación o la reutilización de otros objetos para darles otra utilidad.

1.3.2. Mercado objetivo

- Academia
- Sector industrial de investigación y desarrollo.

1.3.3. Competencia

Es importante analizar la competencia para evaluar el impacto que se puede llegar a tener en el mercado con un nuevo producto.

1.3.3.1. BoXYZ

Es una máquina capaz de realizar distintos procesos de manufactura. Estos son: mecanizado, corte láser e impresión 3D mediante cabezales intercambiables.

Pros: Versatilidad de procesos y materiales
Contras: Elevado costo

1.3.3.2. Kodama Trinus

Máquina capaz de realizar dos procesos de manufactura: Prototipado rápido y grabado láser.

Pros: Versatilidad y bajo costo
Contras: Capacidad limitada en cuanto a materiales

1.3.3.3. Snap Maker

Máquina capaz de realizar distintos procesos de manufactura como: Grabado láser, mecanizado CNC y prototipado rápido.

Pros: Versatilidad y bajo costo
Contras: Capacidad limitada en cuanto a materiales.

1.4. MODELO DE NEGOCIO

1.4.1. Resumen de estrategia

La estrategia, en términos generales, consiste en la venta de equipos. Esto permitirá a los clientes adquirir funciones de prototipado a bajo costo inicial. Y con un servicio que les permita una dinámica de trabajo continua y eficiente.

1.4.2. Business Model Canvas

El Lienzo de Modelo de Negocio o Business Model Canvas (BMC) es una herramienta que permite establecer, de manera sencilla y gráfica, una estrategia de negocio. La estrategia de negocio que se persigue en el presente trabajo se grafica a continuación bajo dicho esquema:

<table>
<tr><td rowspan="2">Socios clave

UTFSM</td><td>Actividades clave

1) Diseño óptimo del equipo, para su durabilidad y buen funcionamiento
2) mantenimiento de una red de contactos importante.</td><td rowspan="2">Propuesta de valor

Implementación de un equipo de prototipado CNC que integra 3 procesos de manufactura (Mecanizado, impresión 3D y grabado láser) y permite trabajar metales blandos, madera y polímeros mediante cabezales intercambiables a bajo costo y con asistencia técnica en el tiempo.</td><td>Relaciones con clientes

Relación mantenida en el tiempo.</td><td rowspan="2">Segmentos de cliente

1) Centros educativos que realizan actividades de prototipado o fabricación a baja escala. 2) Empresas pequeñas y medianas que realizan actividades de prototipado o fabricación a baja escala.</td></tr>
<tr><td>Recursos clave

Equipo de diseño multidisciplinario (informática, electrónica, comercial, mecánica y diseño), materia prima y equipos de fabricación.</td><td>Canales

Página web, redes sociales y teléfono.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Estructura de costos

Materias primas, arriendo de infraestructura y maquinaria y sueldos de equipo de trabajo</td><td colspan="2">Fuentes de ingresos

Venta de equipos</td></tr>
</table>

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-12. Lienzo de modelo de negocio.

1.5. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

A continuación se definen los objetivos a los que responde el desarrollo de este trabajo.

1.5.1. Objetivos generales

- Diseñar y fabricar una máquina CNC de escritorio que permita integrar procesos de mecanizado y manufactura aditiva para el uso de usuarios "Makers" e instituciones académicas de sectores vulnerables.

1.5.2. Objetivos específicos

1) Recopilación e indagación de antecedentes generales para contextualizar el proyecto mediante la definición de un marco teórico que permita facilitar el acceso a esta tecnología y permitir que sea de "código abierto" , de manera de poder ser subvencionadas a entidades educacionales vulnerables.

2) Generar el concepto de diseño de máquina apropiada mediante un análisis de necesidades y benchmarking basado en métricas, que permitan abordar los problemas para realizar una búsqueda interna y externa, que defina la arquitectura y poder establecer dimensiones preliminares.

3) Diseñar, seleccionar y calcular partes y componentes mediante el análisis de esfuerzos presentes en la máquina, para definir procesos, costos de manufactura y de insumos.

4) Manufacturar, seleccionar partes y piezas de un modelo funcional de la máquina de acuerdo a los datos obtenidos e indicaciones generadas por experiencias previas y requerimientos de este trabajo.

5) Analizar la viabilidad económica del proyecto, estimando la demanda de acuerdo a un mercado definido y hacer una estimación preliminar de la factibilidad económica del proyecto, analizándolo desde la perspectiva de un financiamiento público.

2. CAPÍTULO 2: DISEÑO CONCEPTUAL

2.1. NECESIDADES DEL USUARIO

2.1.1. Necesidades

Una de las actividades que marcan el inicio del proceso de diseño propiamente tal es la declaración de necesidades del usuario. Se realizaron diversas entrevistas a personas caracterizadas por su cercanía al mundo DIY y a actividades de prototipado utilizando impresoras 3D y máquinas CNC.

Posteriormente se realizó una transcripción de la entrevista y finalmente se interpretaron las declaraciones para construir una lista de necesidades agrupadas por similitud. Este proceso se caracterizó por estar fuertemente ligado a la toma de decisiones basadas en la experiencia informada.

Tabla 2-1. Necesidades del usuario

N°	Necesidad	Valoración
1	**MECANIZAR**	
1.1	Mecanizar aluminio	5
1.2	Construir acoples	5
1.3	Construir soportes	5
1.4	Realizar características de 1mm de tamaño	5
1.5	Fresar características con herramientas de hasta 1mm de diámetro	5
1.6	Mecanizar partes cilíndricas de 15mm de diámetro	4
1.7	Mecanizar acero	3
1.8	Admitir herramientas de 8mm	2
1.9	Intercambiar herramientas automáticamente	2
1.10	Lograr buen acabado superficial al mecanizar	2
1.11	Refrigerar herramienta de corte	1
1.12	Mecanizar plástico	4
2	**TENER PRECISIÓN**	
2.1	Alcanzar tolerancias de 0.1mm	5
2.2	Tener una tolerancia al imprimir igual o menor a 0.3mm	5
2.3	Tener una tolerancia al mecanizar menor a 0.1mm	5
2.4	Tener 0.05mm de precisión	4
3	**IMPRIMIR EN 3D**	
3.1	Imprimir con 0.1mm de altura de capa	5
3.2	Confiabilidad al imprimir en 3D	5
3.3	Realizar geometrías con voladizos	5
3.4	Permitir usar una amplia gama de filamentos	5
3.5	Que el extrusor no falle	5
3.6	Que las boquillas no fallen	5
3.7	Soportar doble extrusión	5
3.8	Resistir impresión con materiales abrasivos	3
3.9	Soportar impresión con PVA	4
3.10	Facilidad para imprimir	3
3.11	Imprimir Policarbonato	3
3.12	Calentar extrusor hasta 300°C	3
3.13	Tener cama caliente	4
3.14	Remover impresión facilmente de la plataforma	2
4	**TENER DIMENSIONES DE TRABAJO SUFICIENTES**	
4.1	Tener un tamaño de trabajo de 12x10x8mm	5
4.2	Prototipar partes pequeñas	5
4.3	Tener un tamaño de trabajo de 150mm máximo	4
4.4	Tener un tamaño de trabajo de 200x200mm máximo	3
5	**FACILIDAD PARA HACER OPERATIVA**	
5.1	Facilidad para ensamblar	3
5.2	Ensamble intuitivo	3
5.3	Tiempo de puesta en marcha menor a 3 horas	2
5.4	Proporcionar una calibración eficiente y fácil	2

5.5	Intercambio fácil entre cabezales	4
6	**ORDEN Y BUENA CONEXIÓN DE CABLEADO**	
6.1	Mantener orden claro de cables y su conexión	5
6.2	Mantener cables y conexiones aseguradas ante manipulación imprevista	5
6.3	Orden en cableado	5
6.4	Mantener los cables ordenados	5
7	**PODER MODIFICAR EL EQUIPO**	
7.1	Aceptar personalización	5
7.2	Permitir agregar mejoras	4
7.3	Poder agregar funciones accesorias	4
7.4	Permitir modificaciones	2
8	**ROBUSTEZ Y CONFIABILIDAD DE TRANSMISIÓN**	
8.1	Resistir vibraciones	5
8.2	Funcionar correctamente	5
8.3	Tener guías lineales	3
8.4	Tener rodamientos de calidad	3
9	**AISLAR ESPACIO DE TRABAJO**	
9.1	Confinar virutas para mantener la limpieza	2
9.2	Mantener la limpieza del ambiente	2
9.3	El equipo mantiene la temperatura del espacio de impresión	3
9.4	Funcionamiento silencioso	1
9.5	Evitar el acceso de virutas al sistema mecánico	3
9.6	Recolectar virutas	1
10	**VISUALIZAR**	
10.1	Buena visualización del espacio de trabajo	5
10.2	Seguir instrucciones de mecanizado correctamente	4
10.3	Visualizar información de trabajo	3
10.4	Permitir supervisar a distancia	1
11	**CONTROLA**	
11.1	Apagado automático de la máquina	2
11.2	Permitir parar de emergencia a distancia	1
11.3	Permitir control a distancia	2
12	**ESTANDARIZAR UNIVERSALMENTE**	
12.1	Admitir insumos universalmente estandarizados	5
12.2	Estandarización universal de los repuestos	4
13	**PROPORCIONAR ÚTILES**	
13.1	Proporcionar collets en el producto	3
13.2	Proporcionar herramientas en el producto	4
13.3	Existir información de uso on-line	2
14	**ASEGURAR STOCK**	
14.1	Asegurar stock	5
14.2	Tener un tamaño de trabajo mínimo de 10x10mm	3
15	**PERMITIR FÁCIL ACCESO AL ESPACIO DE TRABAJO**	4
16	**TAMAÑO ADECUADO**	2
17	**MANTENCIÓN INTUITIVA**	3
18	**SIMPLICIDAD DE DISEÑO**	2
19	**GRABAR CON LÁSER**	2
20	**TENER UN BAJO COSTO**	
20.1	Tener un valor igual o menor a $600.000	4
20.2	Costo entre 600.000 y 1.000.000 pesos	5

Fuente: Elaboración propia.

Se pudieron identificar 20 necesidades generales, las cuales se valorizaron con el puntaje mas alto. Las primeras 14 necesidades generales de la tabla, tienen asociadas necesidades secundarias, las cuales responden a problemas específicos que surgen de la necesidad primaria.

2.1.2. Métricas

Las métricas son declaraciones que sirven para poder medir y dar objetividad a las necesidades del usuario. Su función es definir cuáles son los requerimientos y cómo se medirán.

Se elaboró una lista de métricas (Tabla 2-2) en donde cada métrica nace de la interpretación objetiva de cada necesidad.

Tabla 2-2. Métricas.

N° Necesidad	Pj.	Métrica	Unidad
1.1	5	Velocidad al mecanizar aluminio*	mm/s
1.4	5	Desbastes internos menores	mm
1.5	5	Diámetro mínimo de herramienta usada	mm
1.6	4	Diámetro mínimo de stock cilíndrico a utilizar	mm
1.7	3	Velocidad al mecanizar acero**	mm/s
1.8	2	Diámetro máximo de herramienta usada	mm
1.9	2	Sistema de cambio automático de herramienta	Binario
1.10	2	Acabado superficial	Ra (µm)
1.11	1	Velocidad máxima del husillo	RPM
1.12	4	Velocidad mínima del husillo	RPM
2.1 ; 2.4	5	Tolerancia alcanzada por proceso de mecanizado	mm
2.2	5	Tolerancia alcanzada por proceso de impresión 3D	mm
3.1	5	Altura de capa mínima	mm
3.2 ; 3.5 ; 3.6	5	Tiempo de impresión continua	días
3.3	5	Flexión de puentes	mm/cm
3.4	5	Diámetro de filamento aceptado	mm
3.4	5	Admitir PLA para imprimir en 3D	Binario
3.4	5	Admitir ABS para imprimir en 3D	Binario
3.4 ; 3.12	4	Admitir Nylon para imprimir en 3D	Binario
3.4	5	Admitir HIPS para imprimir en 3D	Binario
3.4 ; 3.11	4	Admitir Polycarbonato para imprimir en 3D	Binario
3.4	5	Admitir filamentos flexibles para imprimir en 3D	Binario
3.4 ; 3.9	4	Admitir PVA para imprimir en 3D	Binario
3.8	3	Admitir filamentos abrasivos	Binario
3.7	5	Número materiales a extruir	Cantidad
3.10	3	Tiempo de demora para empezar a imprimir desde primera interacción con el usuario	s
3.10	3	Número de acciones necesarias para empezar a imprimir	Cantidad
3.10	3	Tiempo necesario para insertar filamento	minutos
3.10	3	Cantidad de tipos distintos de señales de feedback ante interacciones con usuario	Cantidad
3.13	4	Temperatura max. de plataforma	°C
3.14	2	Incorpora un mecanismo auxiliar para remover impresión de plataforma	Binario
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje X	mm
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje Y	mm
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje Z	mm
5.1 ; 5.2 ; 5.3 ; 5.4	3	Tiempo de ensamble del producto para puesta en marcha	minutos
5.1	3	Cantidad de herramientas necesarias para ensamblar el producto	Cantidad
5.2	3	Satisfacción del usuario al ensamblar el producto	Subjetivo
5.4	2	Tiempo de calibración	minutos
5.5	4	Tiempo de montaje de un cabezal	minutos

6.1 ; 6.3	5	Las conexiones de los cables se visualizan claramente	Binario
6.2	5	Las conexiones de los cables están aseguradas	Binario
6.3 ; 6.4	5	Los cables están ordenados	Binario
7.1	5	Se puede cambiar el color del producto	Binario
7.1 ; 7.2 ; 7.4	4	Se pueden modificar partes del producto	Binario
7.1 ; 7.2	4	Se pueden reemplazar partes del producto	Binario
7.3	4	Cantidad de procesos de manufactura distintos	Cantidad
8.1	5	Frecuencia mínima sin presentar resonancia	kHz
8.1	5	Frecuencia máxima sin presentar resonancia	kHz
8.1	5	Deflexión máxima producida por fuerzas de trabajo	mm
8.1	5	Diámetro del tornillo sinfín	mm
8.1	5	Diámetro de la guía eje X	mm
8.1	5	Diámetro de la guía eje Y	mm
8.1	5	Diámetro de la guía eje Z	mm
8.2	5	Temperatura máxima de los motores	°C
8.2	5	Temperatura máxima de hardware	°C
8.2	5	Corriente máxima consumida por drivers	A
8.2	5	Juego admisible por pieza montada	mm
8.2	5	Velocidad al vacío del cabezal	mm/s
8.2	5	Velocidad al imprimir	mm/s
8.2	5	Precisión de repetición	mm
8.3	3	Tener rieles apoyados	Binario
8.4	3	Juego radial admisible en rodamientos radiales	mm
8.4	3	Juego axial admisible en rodamientos radiales	mm
9.1 ; 9.2	2	Capacidad de aislamiento de virutas hacia el exterior	%
9.1 ; 9.2	2	Capacidad de aislamiento de polvo hacia el exterior	%
9.3	3	Diferencia de temperatura interna y externa	°C
9.4	1	Ruido al funcionar	dB
9.5	3	El sistema mecánico se mantiene limpio	Binario
10.1	5	Distancia necesaria para visualizar espacio de trabajo	m
10.1	5	Tiempo necesario para visualizar espacio de trabajo	s
10.1	5	Iluminación del espacio de trabajo	lux
10.3	3	Distancia necesaria para visualizar info. de trabajo	cm
10.3	3	Tiempo necesario para visualizar info. de trabajo	s
10.3	3	Disponibilidad de información de trabajo	Binario
10.4 ; 11.2 ; 11.3	1	Distancia máxima de supervisión y control	m
11.1	2	Apagado automático	Binario
12.1	5	Admite insumos estandarizados por terceros	Binario
12.2	4	Admite repuestos estandarizados por terceros	Binario
12.2	4	Porcentaje partes compatibles con estandares de 3eros	%
13.1	3	Medidas de collet proporcionadas (desde 1mm hasta)	mm
13.2	4	Medidas de herramientas proporcionadas (desde 1mm)	mm
13.3	2	Existir información de uso on-line	Binario
14.1	5	Fuerza requerida para asegurar stock	Subjetivo
14.1	5	Fuerza lateral que debe soportar el stock	N
14.2	3	Tamaño mínimo de un lado de la base de stock cuadrado a asegurar	mm
15	4	Volumen de espacio libre al interior del espacio de trabajo	cm3
15	4	Cantidad de interacciones para acceder al espacio de trabajo	Cantidad
16	2	Altura del producto	mm
16	2	Ancho del producto	mm
16	2	Largo del producto	mm
16	2	Peso del producto	kg
17	3	Tiempo de mantención realizada por usuario	minutos
17	3	Porcentaje de partes a mantener que se pueden visualizar sin desarmar el equipo	%
17	3	Cantidad de tipos distintos de herramientas necesarios para realizar mantención	Cantidad

18	2	El diseño del producto causa satisfacción	Subjetivo
18	2	Tiempo que demora el usuario de generar un modelo mental del funcionamiento de la máquina al verla por primera vez	s
18	2	El diseño del producto causa tranquilidad	Subjetivo
20	5	Costo del producto	$ (CLP)

Fuente: Elaboración propia.

N/A: No Aplica.
*: Con fresa de 8mm con 1mm de profundidad radial y 1mm axial a 10000RPM.
**: Con fresa de 3mm a profundidad axial de 1mm y radial de 1mm a 10000RPM.
***: Suposición estimada en base a características relacionadas conocidas.

2.2. BENCHMARKING

El análisis de "Benchmarking" o "Comparación con la competencia" se utilizó para guiar el proceso de establecer las especificaciones ideales (Ver Tabla 2-3). Este análisis obtiene mediciones y compara la información disponible de otros productos para poder tomar decisiones basándose en la experiencia ya existente.

Nótese que existen mediciones que por distintos motivos no fue posible obtener de manera directa, debiéndose extrapolar con información ya existente para poder hacer aproximaciones.

Tabla 2-3. Análisis de Benchmarking basado en métricas.

N° Necesidad	Pj.	Métrica	Unidad	Snapmaker Original	6040 CNC 3Axis	BoXZY
1.1	5	Velocidad al mecanizar aluminio*	mm/s	N/A	10***	5
1.4	5	Desbastes internos menores	mm	<1	<1	<1
1.5	5	Diámetro mínimo de herramienta usada	mm	0.5	1	1
1.6	4	Diámetro mínimo de stock cilíndrico a utilizar	mm	40	<30	<30
1.7	3	Velocidad al mecanizar acero**	mm/s	N/A	5***	2***
1.8	2	Diámetro máximo de herramienta usada	mm	6.35	8	8
1.9	2	Sistema de cambio automático de herramienta	Binario	No	No	No
1.10	2	Acabado superficial	Ra (µm)	>12.5***	>6.3***	<6.3***
1.17	1	Velocidad máxima del husillo	RPM	10000	20000	30000
1.12	4	Velocidad mínima del husillo	RPM	10000	10000***	10000***
2.1 ; 2.4	5	Tolerancia alcanzada por proceso de mecanizado	mm	0.1	<0.08***	0.08***
2.2	5	Tolerancia alcanzada por proceso de impresión 3D	mm	0.08***	N/A	0.08***
3.1	5	Altura de capa mínima	mm	0.05	N/A	0.1
3.2 ; 3.5 ; 3.6	5	Tiempo de impresión continua	días	>1	N/A	>1
3.3	5	Flexión de puentes	mm/cm	?	N/A	?
3.4	5	Diámetro de filamento aceptado	mm	1.75	N/A	1.75
3.4	5	Admitir PLA para imprimir en 3D	Binario	Si	N/A	Si
3.4	5	Admitir ABS para imprimir en 3D	Binario	Si	N/A	Si
3.4 ; 3.12	4	Admitir Nylon para imprimir en 3D	Binario	no	N/A	?
3.4	5	Admitir HIPS para imprimir en 3D	Binario	no	N/A	?
3.4 ; 3.11	4	Admitir Polycarbonato para imprimir en 3D	Binario	no	N/A	?
3.4	5	Admitir filamentos flexibles para imprimir en 3D	Binario	Si	N/A	Si

3.4 ; 3.9	4	Admitir PVA para imprimir en 3D	Binario	no	N/A	si
3.8	3	Admitir filamentos abrasivos	Binario	No	N/A	si
3.7	5	Número materiales a extruir	Cantidad	1	N/A	1
3.10	3	Tiempo de demora para empezar a imprimir desde primera interacción con el usuario	s	3	N/A	3
3.10	3	Número de acciones necesarias para empezar a imprimir	Cantidad	3	N/A	N/A
3.10	3	Tiempo necesario para insertar filamento	minutos	1.5	N/A	?
3.10	3	Cantidad de tipos distintos de señales de feedback ante interacciones con usuario	Cantidad	2	1	0
3.13	4	Temperatura max. de plataforma	°C	80	N/A	120
3.14	2	Incorpora un mecanismo auxiliar para remover impresión de plataforma	Binario	Si	N/A	No
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje X	mm	90	580	165
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje Y	mm	90	400	165
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje Z	mm	50	65	165
5.1 ; 5.2 ; 5.3 ; 5.4	3	Tiempo de ensamble del producto para puesta en marcha	minutos	12	60	30***
5.1	3	Cantidad de herramientas necesarias para ensamblar el producto	Cantidad	1	2	1***
5.2	3	Satisfacción del usuario al ensamblar el producto	Subjetivo	Alta	Neutral	Alta
5.4	2	Tiempo de calibración	minutos	2.5	3	3***
5.5	4	Tiempo de montaje de un cabezal	minutos	2	N/A	<1
6.1 ; 6.3	5	Las conexiones de los cables se visualizan claramente	Binario	Si	Si	Si
6.2	5	Las conexiones de los cables están aseguradas	Binario	Si	Si	Si
6.3 ; 6.4	5	Los cables están ordenados	Binario	Si	Si	Si
7.1	5	Se puede cambiar el color del producto	Binario	No	No	Si
7.1 ; 7.2 ; 7.4	4	Se pueden modificar partes del producto	Binario	No	No	No
7.1 ; 7.2	4	Se pueden reemplazar partes del producto	Binario	No	No	No
7.3	4	Cantidad de procesos de manufactura distintos	Cantidad	3	1	3
8.1	5	Frecuencia mínima sin presentar resonancia	kHz	38kHz***	10kHz***	10kHz***
8.1	5	Frecuencia máxima sin presentar resonancia	kHz	76kHz***	76kHz***	76kHz***
8.1	5	Deflexión máxima producida por fuerzas de trabajo	mm	<0.005***	<0.005***	<0.005***
8.1	5	Diámetro del tornillo sinfín	mm	8***	16	16(X,Y), 20(Z)
8.1	5	Diámetro de la guía eje X	mm	N/A	16	N/A
8.1	5	Diámetro de la guía eje Y	mm	N/A	20	N/A
8.1	5	Diámetro de la guía eje Z	mm	N/A	13	N/A
8.2	5	Temperatura máxima de los motores	°C	?	?	?
8.2	5	Temperatura máxima de hardware	°C	?	?	?
8.2	5	Corriente máxima consumida por drivers	A	1.8***	2***	2
8.2	5	Juego admisible por pieza montada	mm	0	0	0
8.2	5	Velocidad al vacío del cabezal	mm/s	120	67	?
8.2	5	Velocidad al imprimir	mm/s	60	N/A	40
8.2	5	Precisión de repetición	mm	?	0.05	0.006
8.3	3	Tener rieles apoyados	Binario	Si	Si	No
8.4	3	Juego radial admisible en rodamientos radiales	mm	?	?	?

8.4	3	Juego axial admisible en rodamientos radiales	mm	?	?	?
9.1 ; 9.2	2	Capacidad de aislamiento de virutas hacia el exterior	%	0	0	70***
9.1 ; 9.2	2	Capacidad de aislamiento de polvo hacia el exterior	%	0	0	60***
9.3	3	Diferencia de temperatura interna y externa	°C	0	0	0
9.4	1	Ruido al funcionar	dB	50 a 60	70	70***
9.5	3	El sistema mecánico se mantiene limpio	Binario	No	No	No
10.1	5	Distancia necesaria para visualizar espacio de trabajo	m	1	2	0.5***
10.1	5	Tiempo necesario para visualizar espacio de trabajo	s	1	1	2
10.1	5	Iluminación del espacio de trabajo	lux	0	0	0
10.3	3	Distancia necesaria para visualizar info. de trabajo	cm	100	N/A	N/A
10.3	3	Tiempo necesario para visualizar info. de trabajo	s	3	N/A	N/A
10.3	3	Disponibilidad de información de trabajo	Binario	Si	No	No
10.4 ; 11.2 ; 11.3	1	Distancia máxima de supervisión y control	m	>20	N/A	N/A
11.1	2	Apagado automático	Binario	No	No	No
12.1	5	Admite insumos estandarizados por terceros	Binario	Si	Si	Si
12.2	4	Admite repuestos estandarizados por terceros	Binario	No	Si	Si
12.2	4	Porcentaje partes compatibles con estandares de 3eros	%	<10	<40***	<20***
13.1	3	Medidas de collet proporcionadas (desde 1mm hasta)	mm	3	6	6.35
13.2	4	Medidas de herramientas proporcionadas (desde 1mm)	mm	N/A	N/A	N/A
13.3	2	Existir información de uso on-line	Binario	Si	Si	Si
14.1	5	Fuerza requerida para asegurar stock	Subjetivo	Baja	Alta	Moderada
14.1	5	Fuerza lateral que debe soportar el stock	N	<50***	<100***	176
14.2	3	Tamaño mínimo de un lado de la base de stock cuadrado a asegurar	mm	40	40	<40
15	4	Volumen de espacio libre al interior del espacio de trabajo	cm3	2000	100000	2000
15	4	Cantidad de interacciones para acceder al espacio de trabajo	Cantidad	0	0	0
16	2	Altura del producto	mm	235	520	357
16	2	Ancho del producto	mm	230	670	388
16	2	Largo del producto	mm	250	870	339
16	2	Peso del producto	kg	10	62	20
17	3	Tiempo de mantención realizada por usuario	minutos	<10	<10	<10
17	3	Porcentaje de partes a mantener que se pueden visualizar sin desarmar el equipo	%	90	100	100
17	3	Cantidad de tipos distintos de herramientas necesarios para realizar mantención	Cantidad	1	2	1
18	2	El diseño del producto causa satisfacción	Subjetivo	Si	Si	Si
18	2	Tiempo que demora el usuario de generar un modelo mental del funcionamiento de la máquina al verla por primera vez	s	3	3	8
18	2	El diseño del producto causa tranquilidad	Subjetivo	Si	No	Si
20	5	Costo del producto	$ (CLP)	519.000	1.140.000	3.704.000

Fuente: Elaboración propia.

N/A: No Aplica
*: Con fresa de 8mm con 1mm de profundidad radial y 1mm axial a 10000RPM
**: Con fresa de 3mm a profundidad axial de 1mm y radial de 1mm a 10000RPM
***: Suposición estimada en base a características relacionadas conocidas

2.3. ESPECIFICACIONES IDEALES

Una vez definidas las métricas, se pudo establecer una lista de especificaciones ideales del producto (Tabla 2-4).

Tabla 2-4. Especificaciones ideales del producto.

N° Necesidad	Pj.	Métrica	Unidad	Valor ideal	Valor marginalmente aceptable
1.1	5	Velocidad al mecanizar aluminio*	mm/s	10	5
1.4	5	Desbastes internos menores	mm	<1	<1
1.5	5	Diámetro mínimo de herramienta usada	mm	0.5	1
1.6	4	Diámetro mínimo de stock cilíndrico a utilizar	mm	<30	40
1.7	3	Velocidad al mecanizar acero**	mm/s	5	2
1.8	2	Diámetro máximo de herramienta usada	mm	8	6.35
1.9	2	Sistema de cambio automático de herramienta	Binario	Si	No
1.10	2	Acabado superficial	Ra (μm)	<6.3	>12.5
1.17	1	Velocidad máxima del husillo	RPM	30000	20000
1.12	4	Velocidad mínima del husillo	RPM	10000	10000
2.1 ; 2.4	5	Tolerancia alcanzada por proceso de mecanizado	mm	0.05	0.08
2.2	5	Tolerancia alcanzada por proceso de impresión 3D	mm	0.08	0.1
3.1	5	Altura de capa mínima	mm	0.05	0.1
3.2 ; 3.5 ; 3.6	5	Tiempo de impresión continua	días	>1	1
3.3	5	Flexión de puentes	mm/cm	0.1	0.2
3.4	5	Diámetro de filamento aceptado	mm	1.75	1.75
3.4	5	Admitir PLA para imprimir en 3D	Binario	Si	Si
3.4	5	Admitir ABS para imprimir en 3D	Binario	Si	No
3.4 ; 3.12	4	Admitir Nylon para imprimir en 3D	Binario	Si	No
3.4	5	Admitir HIPS para imprimir en 3D	Binario	Si	No
3.4 ; 3.11	4	Admitir Polycarbonato para imprimir en 3D	Binario	Si	No
3.4	5	Admitir filamentos flexibles para imprimir en 3D	Binario	Si	No
3.4 ; 3.9	4	Admitir PVA para imprimir en 3D	Binario	Si	No
3.8	3	Admitir filamentos abrasivos	Binario	Si	No
3.7	5	Número materiales a extruir	Cantidad	2	2
3.10	3	Tiempo de demora para empezar a imprimir desde primera interacción con el usuario	s	3	6
3.10	3	Número de acciones necesarias para empezar a imprimir	Cantidad	3	5
3.10	3	Tiempo necesario para insertar filamento	minutos	1.5	2
3.10	3	Cantidad de tipos distintos de señales de feedback ante interacciones con usuario	Cantidad	3	1
3.13	4	Temperatura max. de plataforma	°C	120	80

3.14	2	Incorpora un mecanismo auxiliar para remover impresión de plataforma	Binario	Si	No
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje X	mm	200	165
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje Y	mm	200	165
4.1 ; 4.3 ; 4.4	4	Dimensión de trabajo en eje Z	mm	200	165
5.1 ; 5.2 ; 5.3 ; 5.4	3	Tiempo de ensamble del producto para puesta en marcha	minutos	10	60
5.1	3	Cantidad de herramientas necesarias para ensamblar el producto	Cantidad	1	2
5.2	3	Satisfacción del usuario al ensamblar el producto	Subjetivo	Alta	Neutral
5.4	2	Tiempo de calibración	minutos	2.5	3
5.5	4	Tiempo de montaje de un cabezal	minutos	0.5	1
6.1 ; 6.3	5	Las conexiones de los cables se visualizan claramente	Binario	Si	Si
6.2	5	Las conexiones de los cables están aseguradas	Binario	Si	Si
6.3 ; 6.4	5	Los cables están ordenados	Binario	Si	Si
7.1	5	Se puede cambiar el color del producto	Binario	Si	No
7.1 ; 7.2 ; 7.4	4	Se pueden modificar partes del producto	Binario	Si	No
7.1 ; 7.2	4	Se pueden reemplazar partes del producto	Binario	Si	Si
7.3	4	Cantidad de procesos de manufactura distintos	Cantidad	3	2
8.1	5	Frecuencia mínima sin presentar resonancia	kHz	10kHz	38kHz
8.1	5	Frecuencia máxima sin presentar resonancia	kHz	76kHz	76kHz
8.1	5	Deflexión máxima producida por cargas estáticas	mm	<0.005	0.008
8.1	5	Deflexión máxima producida por cargas dinámicas	mm	<0.05	0.1
8.1	5	Diámetro del tornillo sinfín	mm	16	8
8.1	5	Diámetro de la guía eje X	mm	16	8
8.1	5	Diámetro de la guía eje Y	mm	16	8
8.1	5	Diámetro de la guía eje Z	mm	16	8
8.2	5	Temperatura máxima de los motores	°C	45	55
8.2	5	Temperatura máxima de hardware	°C	35	45
8.2	5	Corriente máxima consumida por drivers	A	2	3.2
8.2	5	Juego admisible por pieza montada	mm	0	0
8.2	5	Velocidad al vacío del cabezal	mm/s	120	67
8.2	5	Velocidad al imprimir	mm/s	100	40
8.2	5	Precisión de repetición	mm	0.006	0.05
8.3	3	Tener rieles apoyados	Binario	Si	Si
8.4	3	Juego radial admisible en rodamientos radiales	mm	<0.001	0.005
8.4	3	Juego axial admisible en rodamientos radiales	mm	<0.001	0.005
9.1 ; 9.2	2	Capacidad de aislamiento de virutas hacia el exterior	%	100	90
9.1 ; 9.2	2	Capacidad de aislamiento de polvo hacia el exterior	%	100	90
9.3	3	Diferencia de temperatura interna y externa	°C	25	15
9.4	1	Ruido al funcionar	dB	45	70
9.5	3	El sistema mecánico se mantiene limpio	Binario	Si	No
10.1	5	Distancia necesaria para visualizar espacio de trabajo	m	2	0.5

10.1	5	Tiempo necesario para visualizar espacio de trabajo	s	1	2
10.1	5	Iluminación del espacio de trabajo	lux	800	500
10.3	3	Distancia necesaria para visualizar info. de trabajo	cm	100	50
10.3	3	Tiempo necesario para visualizar info. de trabajo	s	2	5
10.3	3	Disponibilidad de información de trabajo	Binario	Si	No
10.4 ; 11.2 ; 11.3	1	Distancia máxima de supervisión y control	m	>99999	2
11.1	2	Apagado automático	Binario	Si	No
12.1	5	Admite insumos estandarizados por terceros	Binario	Si	Si
12.2	4	Admite repuestos estandarizados por terceros	Binario	Si	Si
12.2	4	Porcentaje partes compatibles con estandares de 3eros	%	<50	<10
13.1	3	Medidas de collet proporcionadas (desde 1mm hasta)	mm	8	6
13.2	4	Medidas de herramientas proporcionadas (desde 1mm)	mm	8	1
13.3	2	Existir información de uso on-line	Binario	Si	No
14.1	5	Fuerza requerida para asegurar stock	Subjetivo	Baja	Alta
14.1	5	Fuerza lateral que debe soportar el stock	N	176	100
14.2	3	Tamaño mínimo de un lado de la base de stock cuadrado a asegurar	mm	30	50
15	4	Volumen de espacio libre al interior del espacio de trabajo	cm3	2000	1500
15	4	Cantidad de interacciones para acceder al espacio de trabajo	Cantidad	0	2
16	2	Altura del producto	mm	350	600
16	2	Ancho del producto	mm	350	600
16	2	Largo del producto	mm	350	600
16	2	Peso del producto	kg	20	40
17	3	Tiempo de mantención realizada por usuario	minutos	<10	30
17	3	Porcentaje de partes a mantener que se pueden visualizar sin desarmar el equipo	%	100	90
17	3	Cantidad de tipos distintos de herramientas necesarios para realizar mantención	Cantidad	1	2
18	2	El diseño del producto causa satisfacción	Subjetivo	Si	Neutral
18	2	Tiempo que demora el usuario de generar un modelo mental del funcionamiento de la máquina al verla por primera vez	s	3	8
18	2	El diseño del producto causa tranquilidad	Subjetivo	Si	Neutral
20	5	Costo del producto	$ (CLP)	600.000	1.000.000

Fuente: Elaboración propia.

N/A: No Aplica
*: Con fresa de 8mm con 1mm de profundidad radial y 1mm axial a 10000RPM.
**: Con fresa de 3mm a profundidad axial de 1mm y radial de 1mm a 10000RPM.
***: Suposición estimada en base a características relacionadas conocidas.

2.4. ANÁLISIS DE PROBLEMAS

Para comenzar a concebir el producto físico se analizaron los problemas desde un enfoque general, hasta uno un poco más detallado.

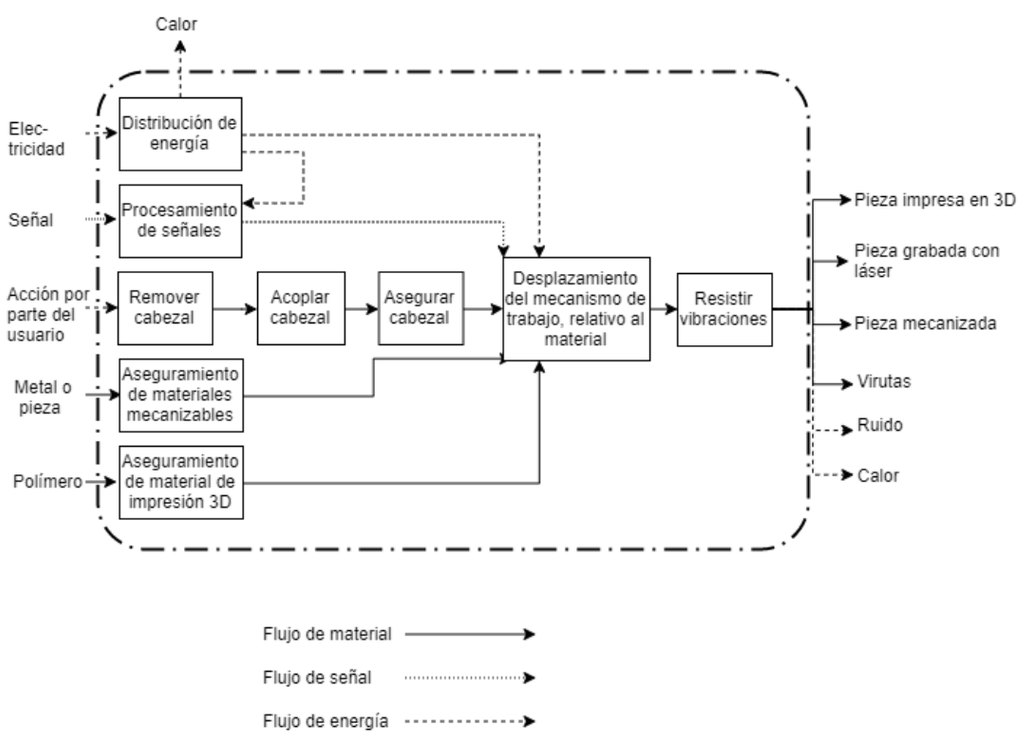
Cada análisis representa una iteración que acota cada vez más y ordena de mejor manera el conjunto de problemas para poder comprenderlos.

2.4.1. Caja negra de funciones generales

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-1. Caja negra de funciones generales.

2.4.2. Caja negra de subfunciones



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-2. Caja negra de subfunciones.

2.4.3. Problemas a solucionar

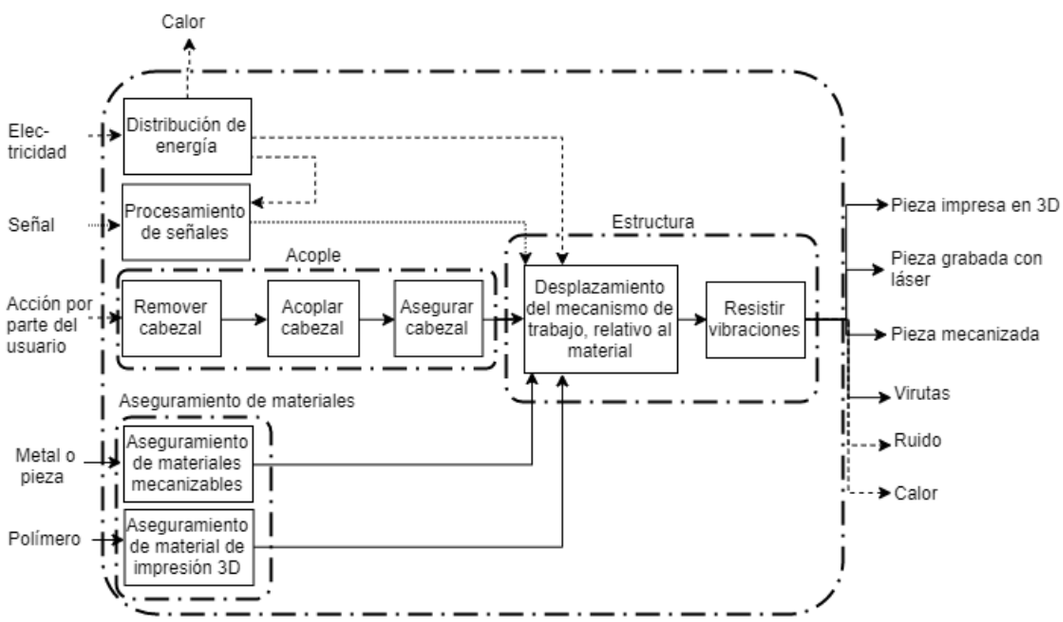
Cada subfunción de la Caja negra de subfunciones puede entenderse como un problema o subproblema a resolver, dependiendo de su complejidad. Algunos de ellos son de solución casi intuitiva, como por ejemplo la subfunción de Distribución de energía es un problema que, debido a su naturaleza y a la tecnología existente, se entiende de antemano solucionado por componentes eléctricos tales como cables, enchufes y un transformador o fuente de poder. Otras subfunciones, en cambio, representan problemas más complejos que deben ser analizados con mayor atención.

Debido a lo anterior, y para ordenar y enfocar mejor el esfuerzo de diseño, se han agrupado las subfunciones más relevantes en tres grupos.

Primero, el grupo de **subfunciones estructurales**, conformado por los problemas de "Desplazamiento de mecanismo de trabajo relativo al material" y "Resistir vibraciones".

En segundo lugar, el grupo de **subfunciones de acople**, formado por los problemas "Remover cabezal", "Acoplar cabezal" y "Asegurar cabezal".

Y en tercer lugar, el grupo se **subfunciones de aseguramiento de material**.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-3. Funciones más relevantes.

Dado que estos grupos corresponden a procesos y funciones específicas mutuamente excluyentes, la búsqueda de concepto se ha dirigido a cada uno. En otras palabras, se han buscado tres conceptos distintos que serán integrados al final para generar el producto en la fase de Selección de Concepto.

2.5. BÚSQUEDA EXTERNA

Una vez comprendidos los problemas que existen, se procede a buscar la solución mediante distintos enfoques. En primer lugar, se recurre a información disponible en la literatura y luego en el mercado.

2.5.1. Literatura

ACOPLE

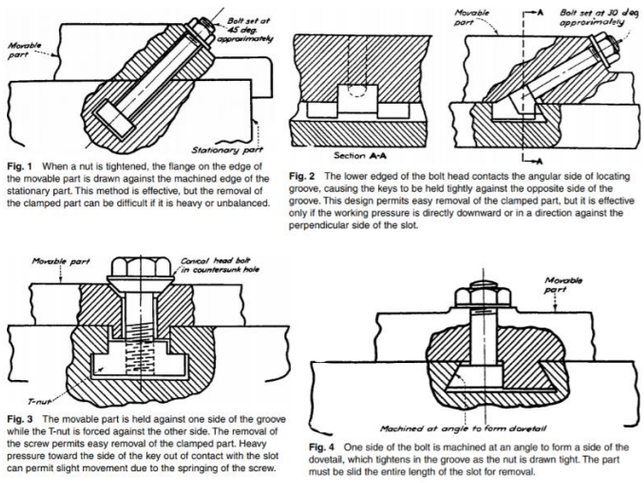


Fig. 1 When a nut is tightened, the flange on the edge of the movable part is drawn against the machined edge of the stationary part. This method is effective, but the removal of the clamped part can be difficult if it is heavy or unbalanced.

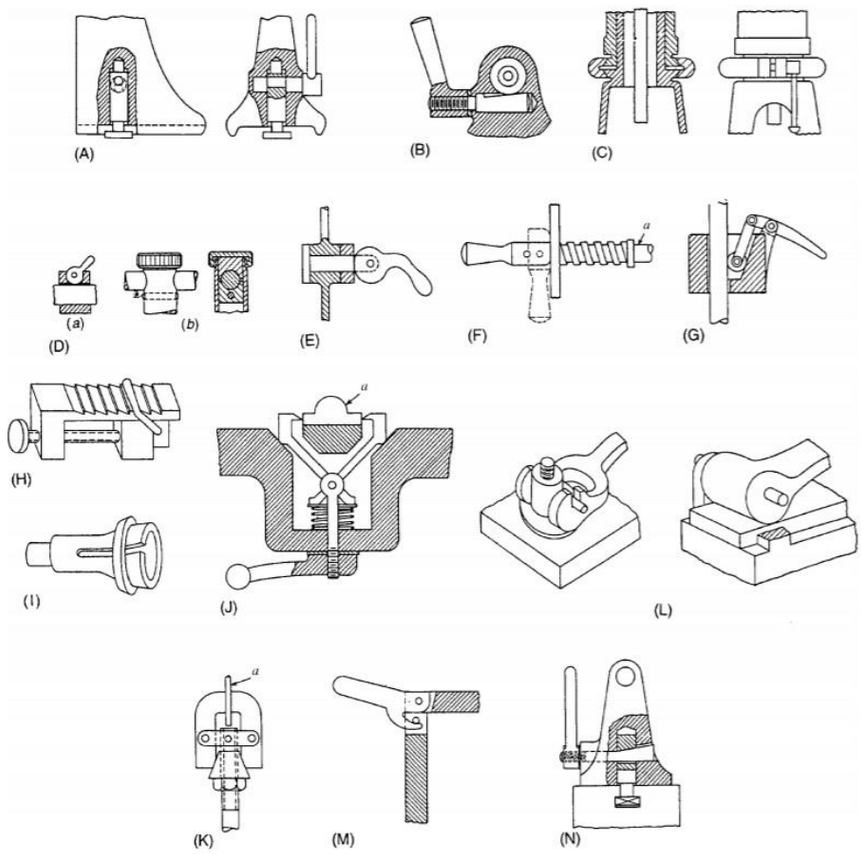
Fig. 2 The lower edged of the bolt head contacts the angular side of locating groove, causing the keys to be held tightly against the opposite side of the groove. This design permits easy removal of the clamped part, but it is effective only if the working pressure is directly downward or in a direction against the perpendicular side of the slot.

Fig. 3 The movable part is held against one side of the groove while the T-nut is forced against the other side. The removal of the screw permits easy removal of the clamped part. Heavy pressure toward the side of the key out of contact with the slot can permit slight movement due to the springing of the screw.

Fig. 4 One side of the bolt is machined at an angle to form a side of the dovetail, which tightens in the groove as the nut is drawn tight. The part must be slid the entire length of the slot for removal.

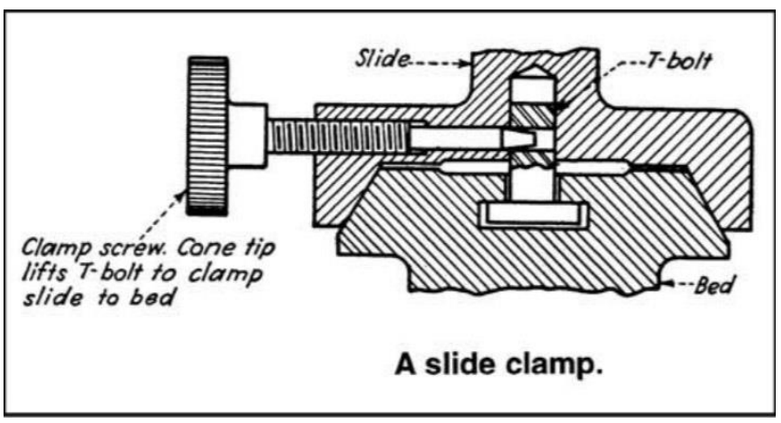
Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 4° edición, P 248.

Figura 2-4. Fijaciones mediante pernos.



Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 4° edición, P 241.

Figura 2-5. Tipos de mordazas de acción rápida, también llamadas prensas de liberación rápida.



Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 4° edición, P 244

Figura 2-6. Mordaza deslizante.

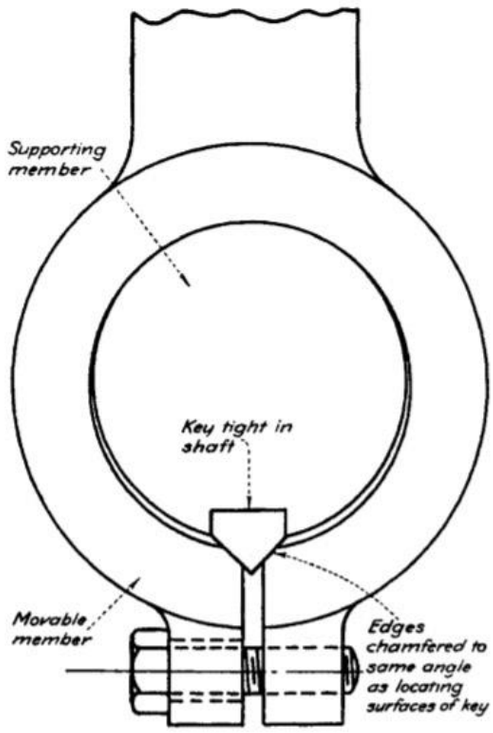


Fig. 11 As the screw is tightened, the chamfered edges of the cut tend to ride outward on the angular surfaces of the key. This draws the movable member tightly against the opposite side of the shaft.

Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 5° edición P 258.

Figura 2-7. Acople o mordaza de abrazadera.

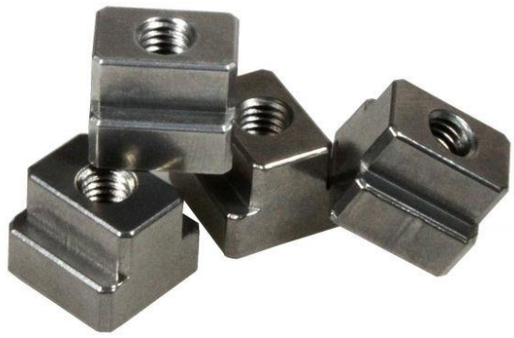
ASEGURAMIENTO DE MATERIAL

Ranuras en T

Fuente: www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling/

Figura 2-8. Plataforma con surcos en T o "T-Slots"

Las ranuras en T son la forma más común para fijar elementos a una plataforma en máquinas CNC. Entregan rigidez y versatilidad al posicionar las piezas. Se utilizan en conjunto con tuercas para ranuras en T, con su respectivo perno.

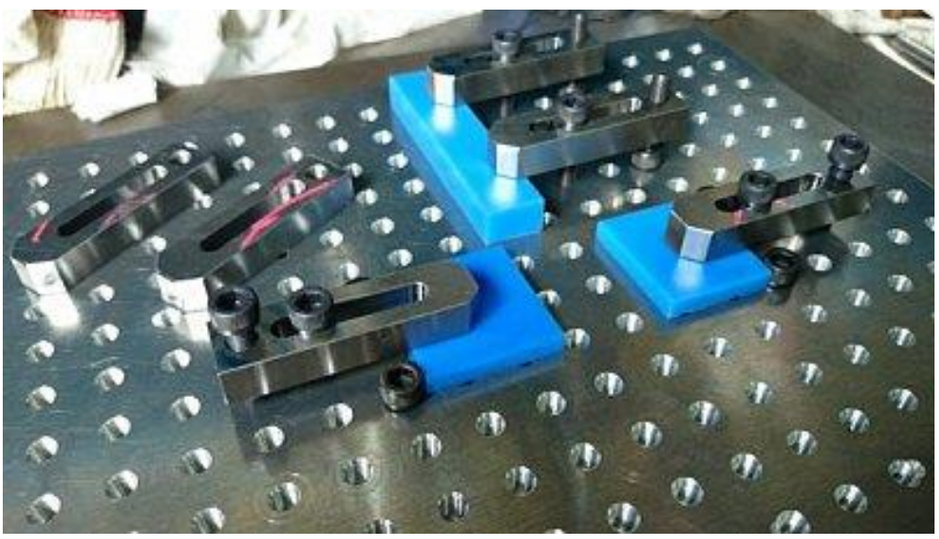


Fuente: www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling/

Figura 2-9. Tuercas para ranuras en T.

Plataforma perforada o "Tooling plate"

Las "Tooling plate" son plataformas con perforaciones roscadas que permiten montar de manera muy fácil elementos de fijación mediante pernos. Además, facilitan la repetibilidad de trabajos, ya que permiten tener referencias para ajustar posiciones con cierta precisión.

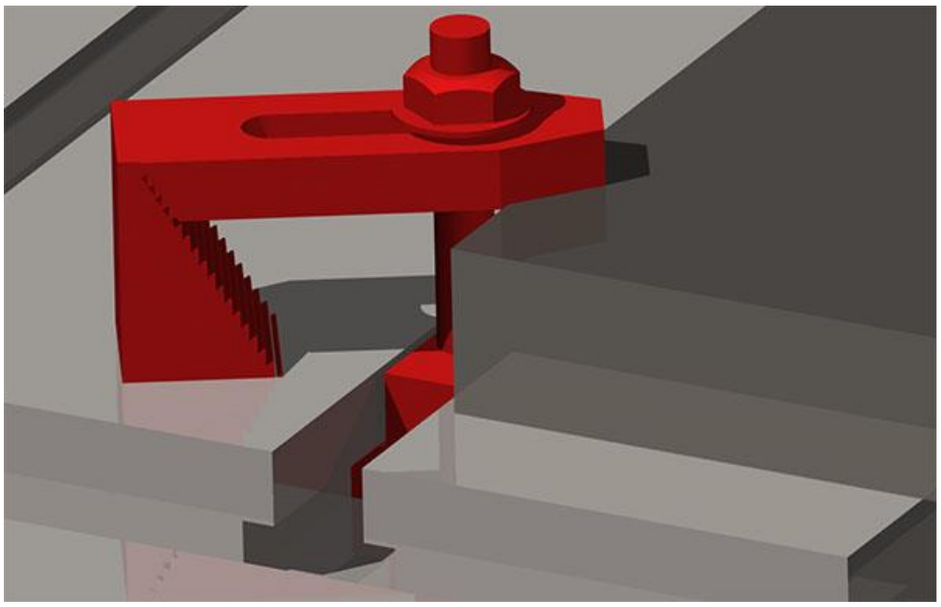


Fuente: en.industryarena.com/forum/replace-t-slot-tooling-plate--315404.html

Figura 2-10. Plataforma perforada con elementos de fijación.

Bridas o Garras de sujeción

El tipo más común de fijación son las bridas. Funcionan ejerciendo presión en un extremo mediante un apoyo fijo (Bloque escalonado o perno) en el extremo opuesto y un apoyo ajustable entre los dos extremos. Son comunmente utilizados con plataformas ranuradas, pero también pueden ser usados con pernos sobre plataformas con perforaciones roscadas.



Fuente: www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling

Figura 2-11. Brida con bloque de apoyo escalonado.

Fuente: www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling

Figura 2-12. Elementos para bridas de sujeción.

Bridas "Toe-Clamps"

Similares a las bridas, pero que a diferencia de éstas, la presión de agarre la ejercen lateralmente, para sujetar la pieza de los costados y, de esta manera, dejar la superficie superior para poder mecanizar con mayor libertad.

Fuente: www.cnccookbook.com/cnc-jigs-fixtures-workholding-solutions-milling

Figura 2-13. "Toe-Clamp"

ESTRUCTURA

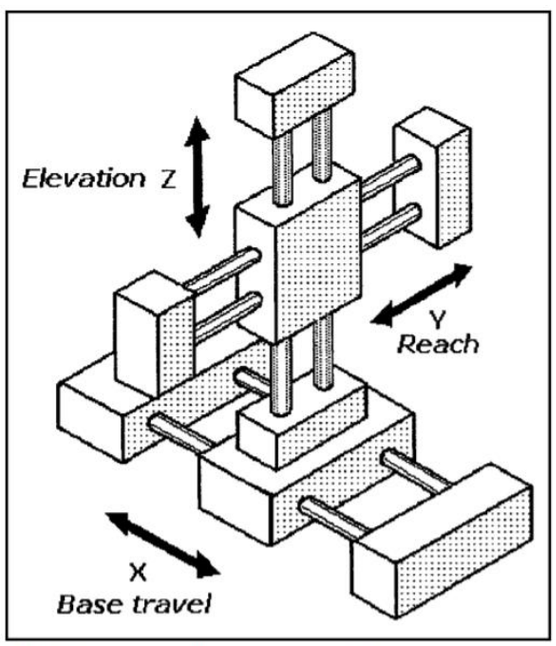


Fig. 5 Cartesian-coordinate geometry robot.

Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 4° edición P 54

Figura 2-14. Geometría de coordenadas cartesianas

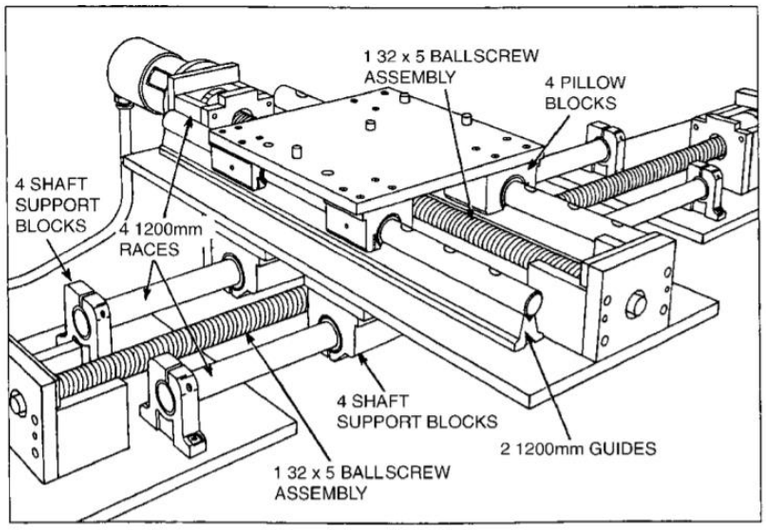


Fig. 3 Pick and Place X-Y System: Catalog support and pillow blocks, ballscrew assemblies, races, and guides were in the assembly of this X-Y system that transfers workpieces between two separate machining stations.

Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 4° edición P 29.

Figura 2-15. Sistema de desplazamiento XY

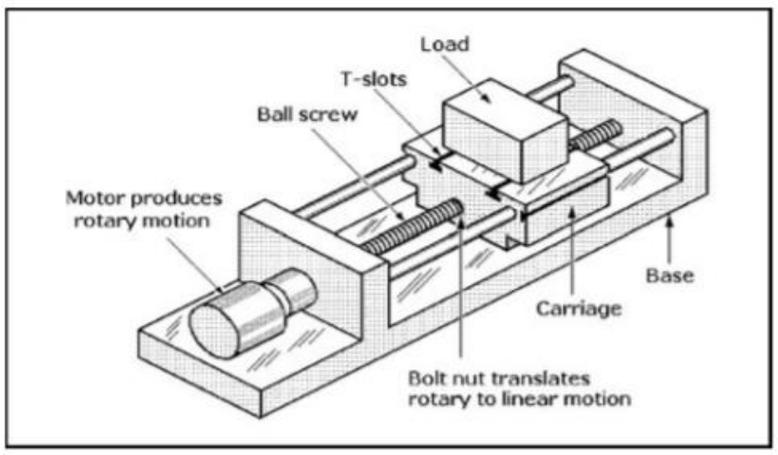


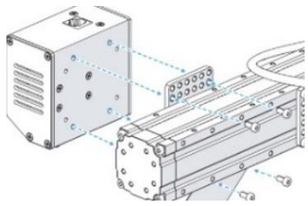
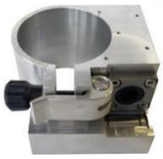
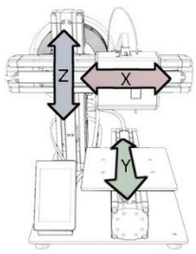
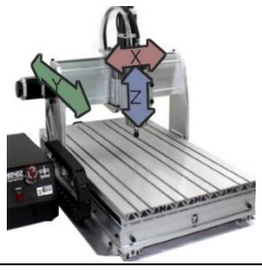
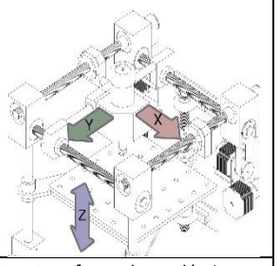
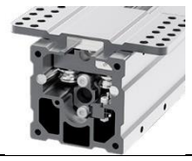
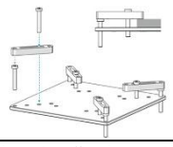
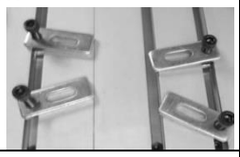
Fig. 13 Ballscrew-driven single-axis slide mechanism translates rotary motion into linear motion.

Fuente: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook 4° edición P 25.

Figura 2-16. Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sinfín

2.5.2. Benchmarking de conceptos

Tabla 2-5. Análisis de benchmarking de conceptos

Problema	Subproblema	Snapmaker Original	6040 CNC 3Axis	BoXZY
Acople	Remover cabezal	Acople y fijación mediante 4 pernos M4x8 hexagonales.		Levantar prensa de liberación rápida.
	Acoplar cabezal			Cabezales cilíndricos encajan dentro de una geometría cilíndrica.
	Asegurar cabezal		Abrazadera fija mediante 4 pernos. El apriete de éstos asegura herramienta y cabezal.	Mecanismo de abrazadera con perno y leva de apriete o prensa de liberación rápida. 
Estructura	Desplazamiento del mecanismo de trabajo, relativo al material	Cartesiana con cabezal móvil en eje XZ y plataforma móvil en Y. Transmisión mediante tornillos sinfín alojados al interior de cada perfil de eje. 	Cartesiana con pórtico móvil en eje Y, cabezal móvil en XZ y plataforma fija. 	Cartesiana con cabezal móvil en XY y plataforma en cantilever móvil en Z. Transmisión por medio de tornillos sinfín en ejes XYZ. 
	Resistir vibraciones	Perfiles de aluminio extruidos con guías tubulares empotradas al interior. 		Estructura formada por láminas de aluminio.
Aseguramiento de materiales	Aseguramiento de materiales mecanizables	Bridas ancladas mediante pernos a perforaciones en la plataforma. 	Plataforma con ranuras para bridas. 	Twitst clamps.
	Aseguramiento de material de impresión 3D	Superficie autoadhesiva reutilizable con textura que permite una buena adhesión a la impresión.		El fabricante sugiere usar Masking Tape. Se calibra manualmente con pernos en 3 puntos.

Fuente: Elaboración propia.

2.6. BÚSQUEDA INTERNA

Siguiendo con la búsqueda de soluciones, se adopta un enfoque interno, es decir, analizar mediante un procedimiento creativo y basado en la experiencia.

2.6.1. Lluvia de ideas

Tabla 2-6. Lluvia de ideas.

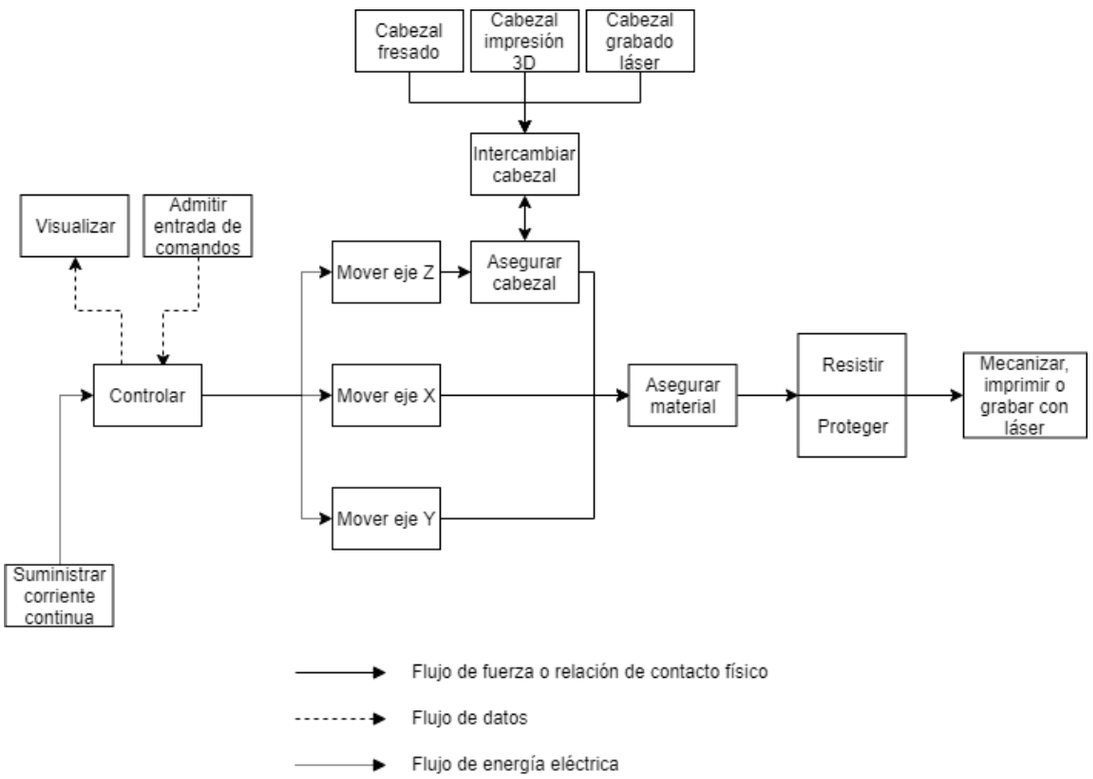
Grupo de subfunciones	**Acople**			**Estructural**		**Aseguramiento de materiales**
Acción específica	**Remover cabezal**	**Acoplar cabezal**	**Asegurar cabezal**	**Desplazamiento de mecanismos de trabajo, relativo al material**	**Resistir vibraciones**	**Asegurar material**
Lluvia de ideas	• Resorte • Inversión de polaridad de imanes	• Acople cónico • Ensamble cola de pato • Ranuras con macho	• Perno • Abrazadera con perno • Electroimán	• Cartesiana de pórtico fijo con cabezal móvil en X y Z y plataforma móvil en Y	• Estructura formada con perfiles metálicos	•Imanes •Vacío
		• Cuerpo del cabezal con forma cilíndrica para encajar en una abrazadera	• Imán	• Cartesiana de pórtico fijo con cabezal móvil en Z y plataforma móvil en X e Y	• Estructura tipo caja formada con planchas metálicas	
				• Cartesiana de pórtico fijo con cabezal móvil en X y plataforma móvil en Y-Z	• Estructura formada por chapa metálica plegada	
				• Cartesiana de pórtico móvil con cabezal móvil en X,Y,Z	• Estructura metálica sólida por fundición	
				• Cartesiana de pórtico móvil con cabezal móvil en XY y plataforma en Z		

2.7. ARQUITECTURA

La arquitectura de un producto es el esquema por el cual los elementos funcionales del producto se acomodan en trozos físicos y por medio del cual éstos interactúan (Ulrich & Eppinger, 2013). Y se puede definir mediante un proceso de cuatro pasos:

1. Crear un esquema del producto.
2. Agrupar los elementos del esquema.
3. Crear una disposición geométrica aproximada.
4. Identificar las interacciones fundamentales e incidentales.

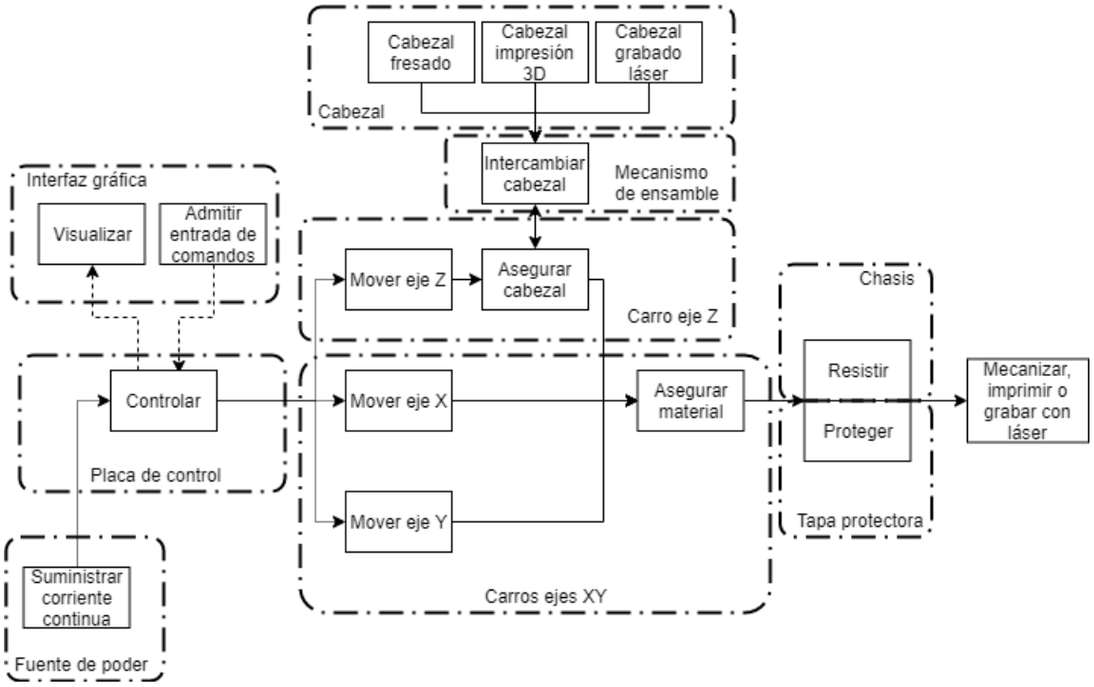
2.7.1. Esquema de producto con elementos funcionales y físicos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-17. Esquema de elementos físicos y funcionales del producto

2.7.2. Esquema de elementos funcionales y físicos agrupados

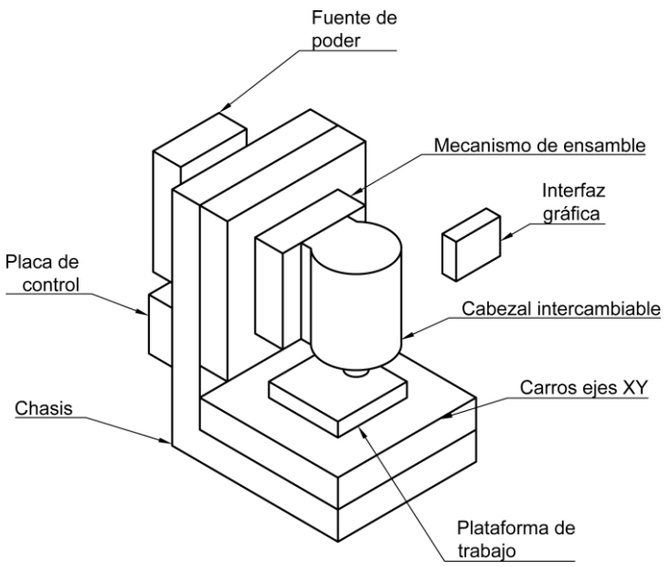


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-18. Esquema de elementos físico y funcionales agrupados

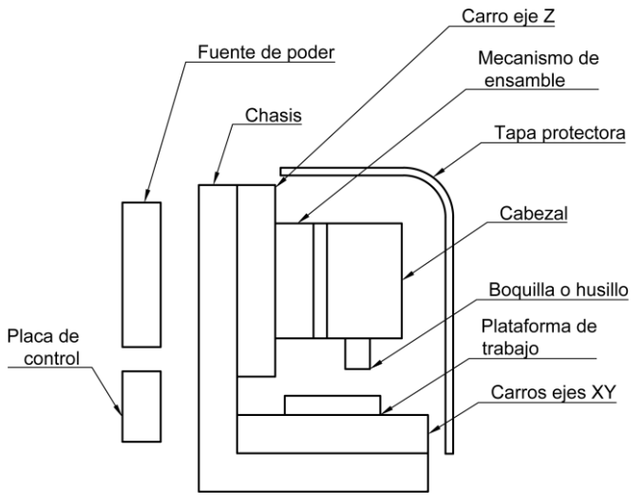
2.7.3. Disposición geométrica aproximada

De acuerdo con las relaciones entre funciones y elementos físicos declarada anteriormente, se puede establecer la siguiente aproximación de la disposición geométrica necesaria de los elementos de la máquina:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-19. Disposición geométrica aproximada perspectiva

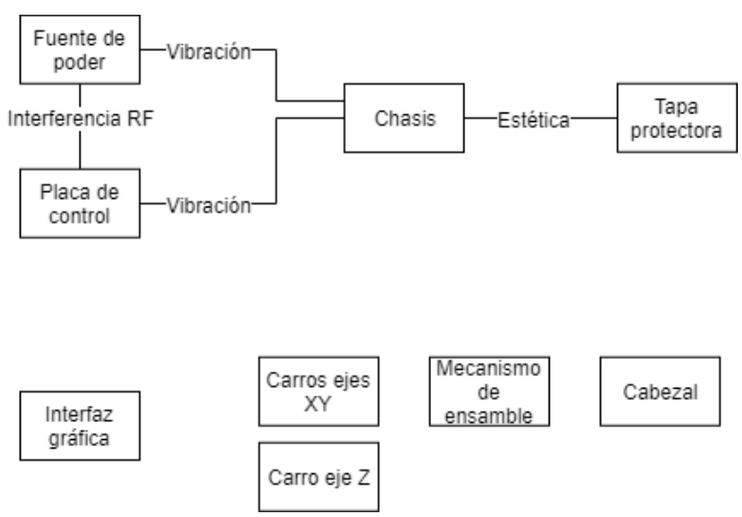


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-20. Disposición geométrica aproximada vista lateral

2.7.4. Interacciones fundamentales incidentales

Es útil identificar las interacciones que se producen de manera incidental, ya que pueden tener un impacto negativo que perjudique el desempeño del producto.



Fuente: Elaboración propia.

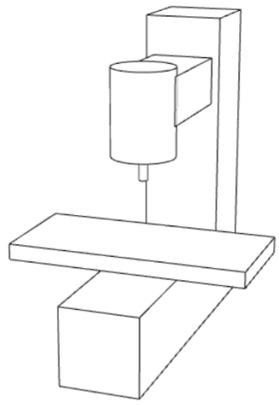
Figura 2-21. Interacciones fundamentales incidentales

A partir de la arquitectura anteriormente establecida, se pueden hacer las siguientes conclusiones de diseño:

1) El recorrido del Carro eje Z está limitado por la altura entre éste y la Tapa protectora
2) Las placas de control electrónico deben ir aisladas del chasis. Ya sea por separadores anti-vibración o separadas en otro módulo.
3) La tapa protectora debe considerar una relación estética con el chasis
4) El chasis o estructura principal debe ser un elemento solidario que soporte los carros de todos los ejes.
5) Las dimensiones de los Carros ejes XY deben ser de al menos el doble de las dimensiones de la plataforma de trabajo

2.8. CONCEPTOS

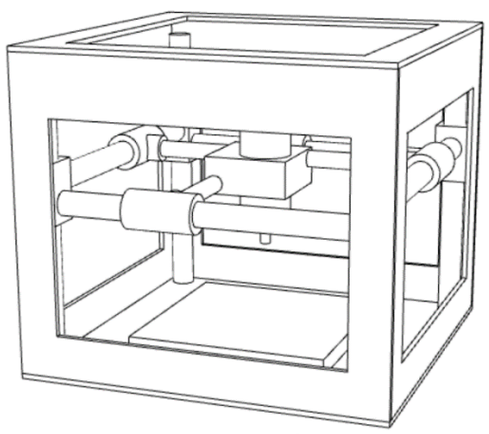
A



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-22. Concepto A

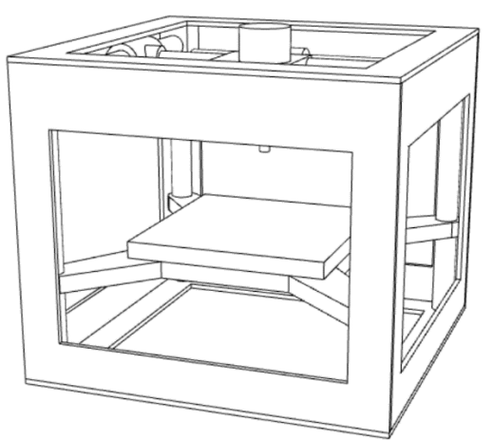
B



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-23. Concepto B

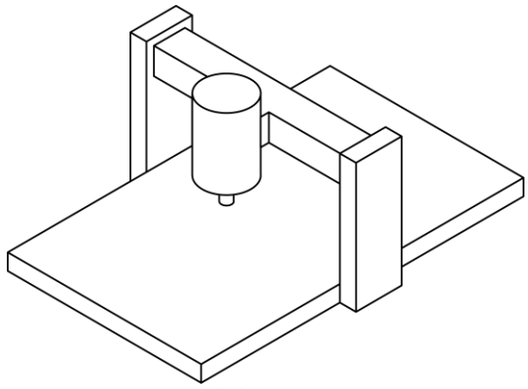
C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-24. Concepto C

D



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-25. Concepto D

2.9. SELECCIÓN DE CONCEPTO

La selección del concepto es un proceso que sirve para comparar los puntos fuertes y débiles de los conceptos, basándose en las necesidades del cliente y otros criterios. El objetivo de esto es elegir uno para su posterior investigación, prueba o desarrollo (Ulrich & Eppinger, 2013).

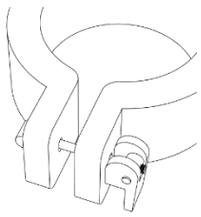
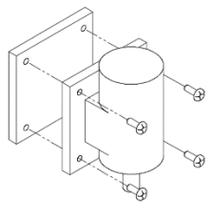
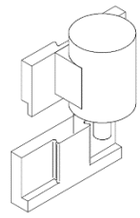
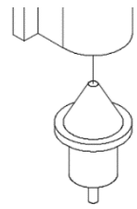
En este trabajo, los conceptos responden a los problemas a solucionar, en otras palabras, materializan las subfunciones (Ver punto 2.4.3).

Se ha utilizado una matriz de selección para escoger cada concepto obtenido a partir de las búsquedas externas e interna según su tipo (Subfunción de acople, Subfunción de estructura y Subfunción de aseguramiento de material) y, al tratarse de una etapa temprana en el desarrollo del producto, se han empleado criterios de carácter subjetivo para su evaluación.

Las matrices están estructuradas con los conceptos en la fila superior, y criterios en la columna lateral que son algunas de las necesidades generales del usuario. Se han incorporado sólo las necesidades que son pertinentes a este análisis y algunas se han modificado para mayor coherencia.

En la siguiente página, se presenta la matriz de selección de concepto de acople.

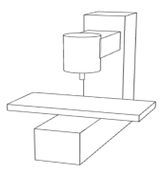
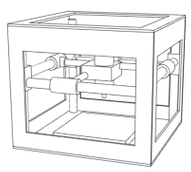
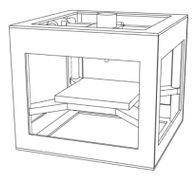
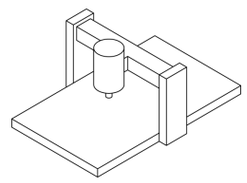
Tabla 2-7. Matriz de selección de concepto de acople

	Conceptos de Acople			
	A	B	C	D
				
	Abrazadera con liberación rápida de perno y leva	Fijación mediante pernos	Fijación mediante ensamble de cola de pato	Fijación mediante ensamble cónico
Criterios				
Visualizar	+	0	0	-
Robustez y confiabilidad de transmisión	-	+	0	+
facilidad para hacer operativa	+	0	+	+
Facilidad de uso	0	-	+	+
Tener un costo bajo	+	+	-	-
Facilidad de fabricación	+	+	0	-
Puntaje total	**3**	**2**	**2**	**3**

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la matriz de selección de concepto de estructura:

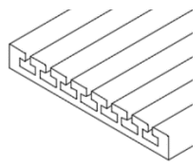
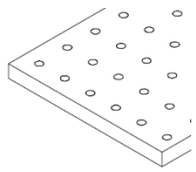
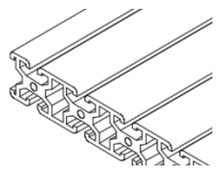
Tabla 2-8. Matriz de selección concepto de estructura

	Conceptos de estructura			
	A	B	C	D
				
Criterios				
facilidad para hacer operativa	0	-	-	0
orden y buena conexión del cableado	0	+	+	0
Poder modificar el equipo	+	-	-	0
Robustez y confiabilidad de transmisión	+	0	-	+
Aislar espacio de trabajo	-	+	+	-
Visualizar	+	0	-	+
Permitir fácil acceso al espacio de trabajo	+	-	-	+
Tamaño adecuado	+	0	0	+
Mantención intuitiva	+	-	-	+
Simplicidad de diseño	+	-	-	+
Tener un costo bajo	+	-	-	+
Puntaje total	**7**	**-4**	**-6**	**5**

Fuente: Elaboración propia.

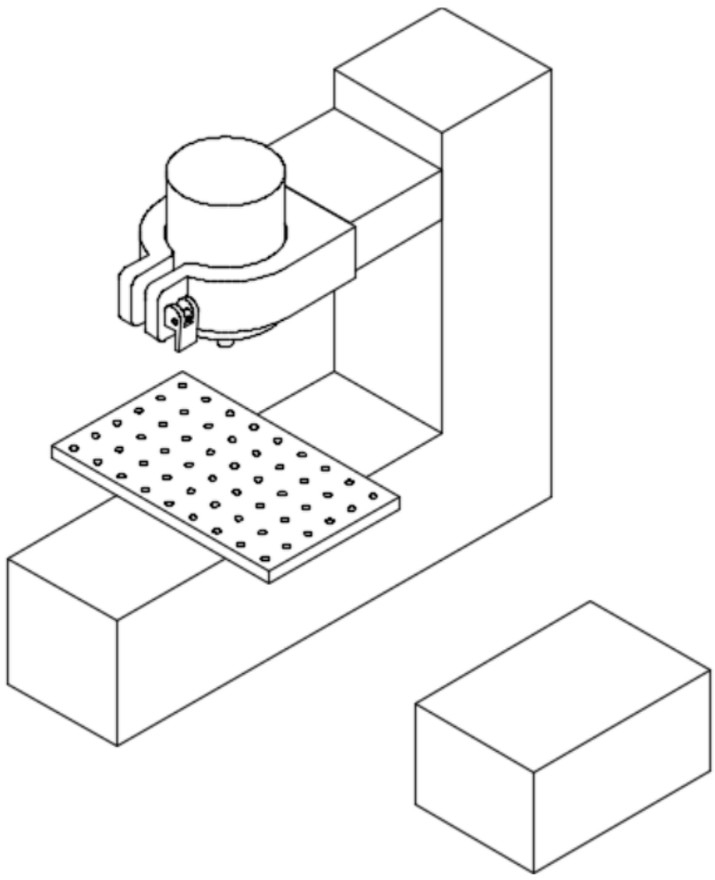
A continuación, se presenta la matriz de selección de concepto de aseguramiento de material:

Tabla 2-9. Matriz de selección de concepto de aseguramiento de material

	Conceptos de aseguramiento de material		
	A	B	C
			
	Plataforma maciza con T-Slots	Plataforma perforada	T-Slots en perfil de aluminio extruido
Criterios			
Tener dimensiones de trabajo suficientes	+	+	+
Asegurar stock	+	+	0
Visualizar	+	+	+
Robustez y confiabilidad de transmisión	+	+	0
Permitir fácil acceso al espacio de trabajo	+	+	+
Facilidad de uso	+	+	+
Estandarizar universalmente	+	+	+
Tener un costo bajo	-	+	+
Puntaje total	**6**	**8**	**6**

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo este razonamiento, se han seleccionado los conceptos de estructura A, de acople A y de aseguramiento de material B. Integrados, dan origen al concepto de diseño que aparece en la figura:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2-26. Concepto de diseño de la máquina

Se puede observar una estructura compuesta por una sola pieza en forma de L, una plataforma con perforaciones, un cabezal con un sistema de acople mediante un sistema de liberación rápida en abrazadera, de perno y leva y la electrónica en una caja a un costado.

2.10. DIMENSIONES PRELIMINARES

Se puede establecer según razonamientos de requerimientos de usuario y de benchmarking, unas dimensiones de trabajo de 150x150x150mm, (X, Y,Z).

De esta manera, la mesa de trabajo debe ser de al menos 150x150mm, la plataforma soportante debe ser al menos el doble de esta dimensión para poder cumplir con un recorrido que permita el uso total de la mesa. Además, la parte vertical de la estructura debe permitir un desplazamiento de al menos 150mm, por lo que su longitud debe ser al menos esa medida.

3. CAPÍTULO 3: DISEÑO DE DETALLES

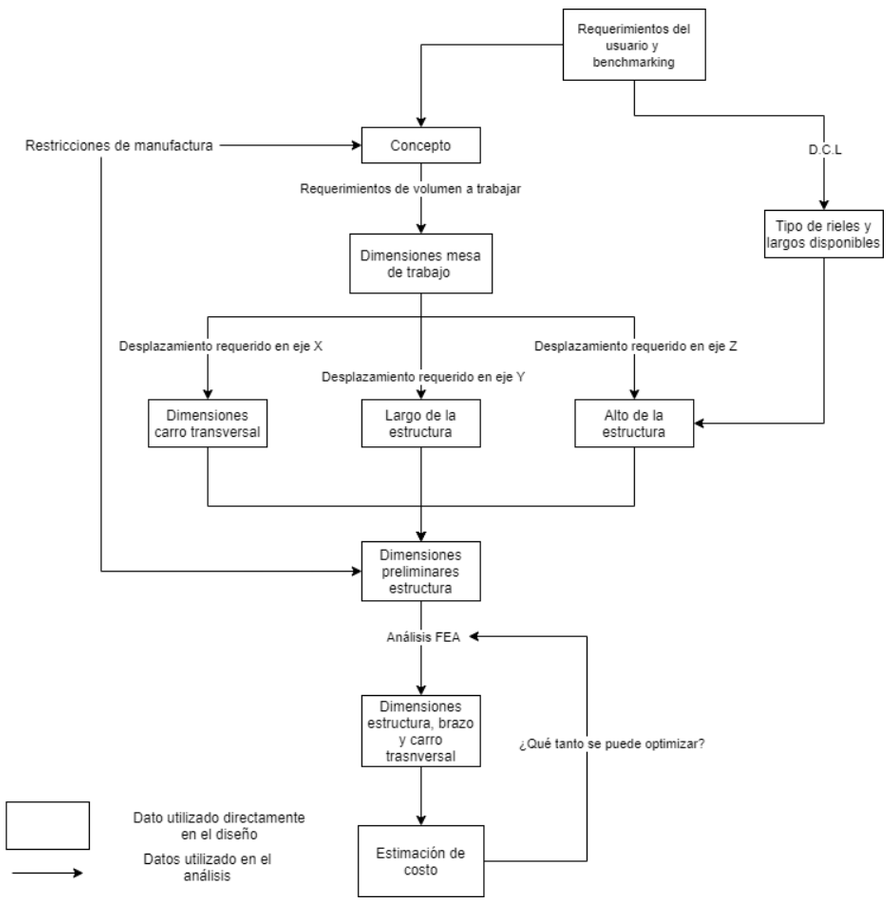
El conjunto máquina, herramienta y pieza están sujetos a cargas dinámicas durante el proceso de mecanizado y estas cargas pueden producir defectos en la pieza a mecanizar debido a deflexiones estructurales de la máquina (H. Chanal, 2006).

Debido a esto, en el diseño de máquinas de manufactura, la rigidez es comúnmente una de las consideraciones más importantes a tener en cuenta. Para máquinas herramientas, una rigidez mayor permite velocidades de mecanizado más altas, entregando la precisión, acabado superficial y la vida útil que se desea (B.S. El-Khasawneh, 1999).

Además, según Terrier (2004), una estructura será mejor que otra dependiendo de la operación de mecanizado requerida.

Así, se ha decidido concebir el diseño de detalles de la máquina considerando como objetivo la deflexión estructural mínima posible producto de las fuerzas de mecanizado, de acuerdo al costo, materiales y procesos disponibles para realizar el proyecto (Gieck, 2016).

El proceso de diseño empleado se puede condensar de manera simplificada según el siguiente esquema:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-1. Proceso de diseño de detalles simplificado mostrando los hitos más notables.

3.1. FUERZAS

Como ya se ha mencionado, las fuerzas producidas en el proceso de mecanizado dan origen a deflexiones en los elementos estructurales de la máquina. Las dos fuerzas que gobiernan el funcionamiento de todas las partes de la máquina son las fuerzas de corte producidas de forma directa en el proceso de mecanizado, y las fuerzas producidas por efectos de aceleración de los distintos componentes para generar desplazamiento.

3.1.1. Fuerzas de mecanizado

Las fuerzas a las que estará sometida la máquina producto del proceso de mecanizado se le llaman fuerzas de corte.
Las fuerzas de corte surgen en la periferia de la herramienta y son tangenciales a la rotación de ésta.

La magnitud de la fuerza de corte en un proceso de mecanizado en una fresadora se puede calcular con la siguiente fórmula (Gieck, 2016):

$$F = \frac{\emptyset t f K}{v}$$

Aplicando los siguientes parámetros, se obtiene una fuerza de corte de 47,8N (Ver: ANEXO B: Cálculos de fuerzas):

$\emptyset = 3mm$

$t = 0{,}5mm$

$f = 300\ mm/min$

$\sigma_k = 400N/mm2$

$RPM = 1000$

$\mathrm{a} = 2{,}5$

La fuerza de corte se repartirá entre el trabajo que realiza el husillo o spindle, y la fuerza de avance que los motores stepper realizan para desplazar la pieza a mecanizar. Para poder abarcar el mayor rango de situaciones esperables, se ha considerado razonable utilizar la fuerza de corte total como la que debe alcanzar el motor del husillo y los motores stepper cada uno por separado.

3.1.2. Fuerzas por aceleración

Además de las fuerzas producto del mecanizado, existe una fuerza producida por el efecto de mover el peso de la masa móvil en la máquina.

El software Marlin, para impresoras 3D, viene configurado con una aceleración de 3000mm/s2. Algunos fabricantes lo reducen hasta 1000mm/s2 para mayor estabilidad en la calidad de impresión. Por otra parte, el firmware para máquinas CNC DIY, GRBL v1.1, utiliza 1000mm/s2 de aceleración en su configuración (Un tercio de la aceleración de Marlin para impresoras 3D).
Por otro lado, según la página web Cadem.com (2017), un centro de mecanizado CNC trabaja con aceleraciones típicas de 2000mm/s2.

Se ha decidido utilizar la aceleración de 3000mm/s2, ya que se trata de un valor adecuado para operaciones de impresión 3D y, presumiblemente, para mecanizado.

Se sabe que el concepto involucra el uso de tornillos sinfín para trasmitir el movimiento rotacional de los motores a avance lineal. Por lo tanto, para calcular la magnitud de la fuerza de aceleración, se debe conocer el peso que será desplazado en la máquina.

Asumiendo que la dimensión máxima de la pieza a montar tiene unas dimensiones de 150mm3, entonces la masa es de 26kg. Sumándole un valor aproximado de partes estructurales (tornillo sinfín, soportes, rodamientos, etc) la masa queda en 30kg.

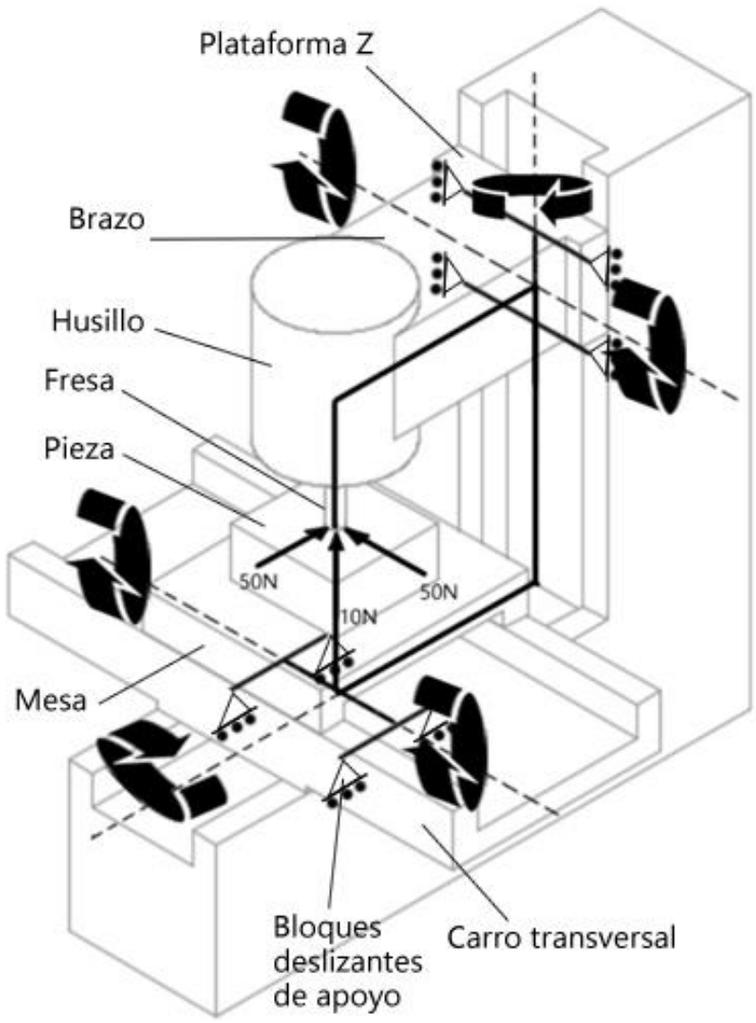
De esta manera, la fuerza necesaria para acelerar una masa de 30kg es de 90N (Ver: ANEXO B: Cálculos de fuerzas):

3.1.3. Fuerzas de roce

Todo elemento deslizante opone una fuerza de resistencia al avance por efectos de roce. En el caso de la máquina, los elementos que producirán una fuerza de roce son las guías lineales.

Según el manual de información técnica de guías lineales HIWIN (2020), el coeficiente de fricción de los rieles MGN es de 0,004, siendo la fuerza de fricción en los rieles igual a *1,176N* (Ver: ANEXO B: Cálculos de fuerzas)

3.2. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE



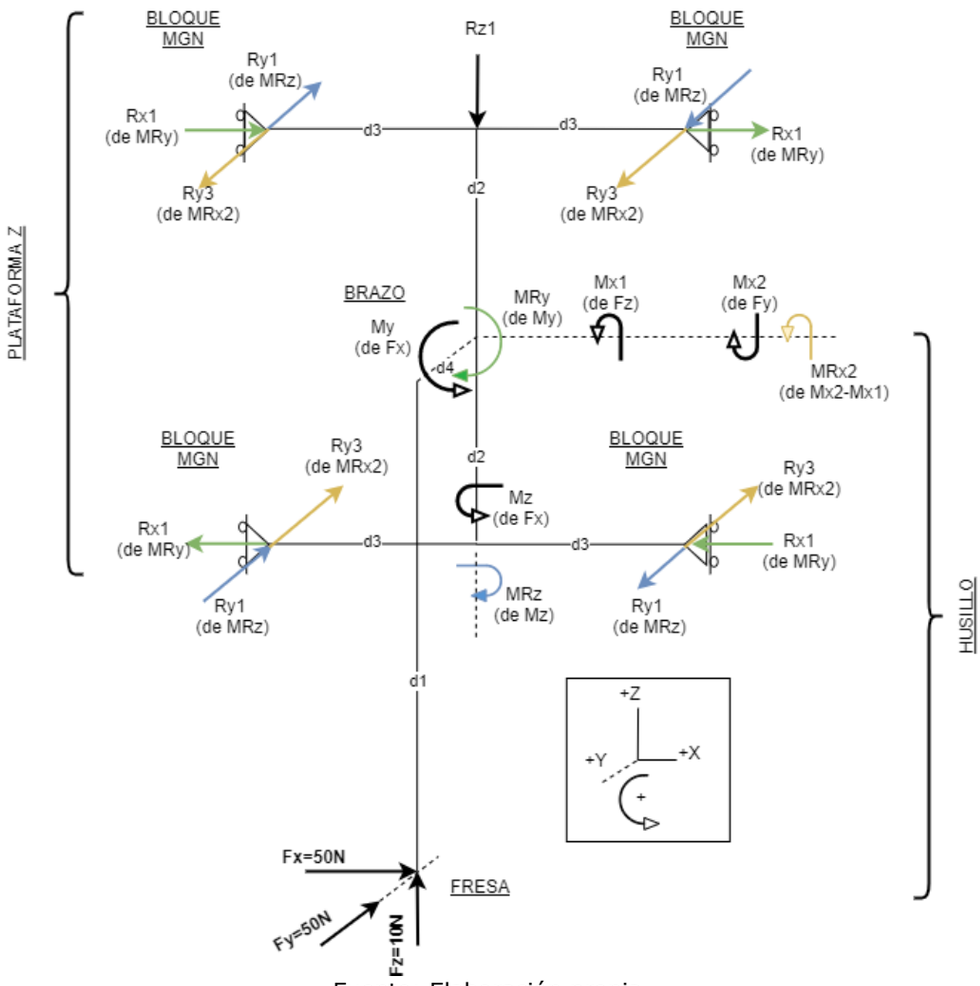
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-2. Diagrama de cuerpo libre simplificado

La figura 3-3 muestra la manera en que actúan los momentos que aparecen por efecto de las fuerzas surgidas del proceso de mecanizado. Los apoyos deslizantes están representados por triángulos con tres círculos negros en la cara deslizante, y las líneas negras gruesas representan la geometría estructural simplificada que será utilizada para ilustrar el diagrama de cuerpo libre en la página siguiente. Las flechas circulares indican la posición y dirección de los momentos de reacción, no la cantidad ni la magnitud de éstas.

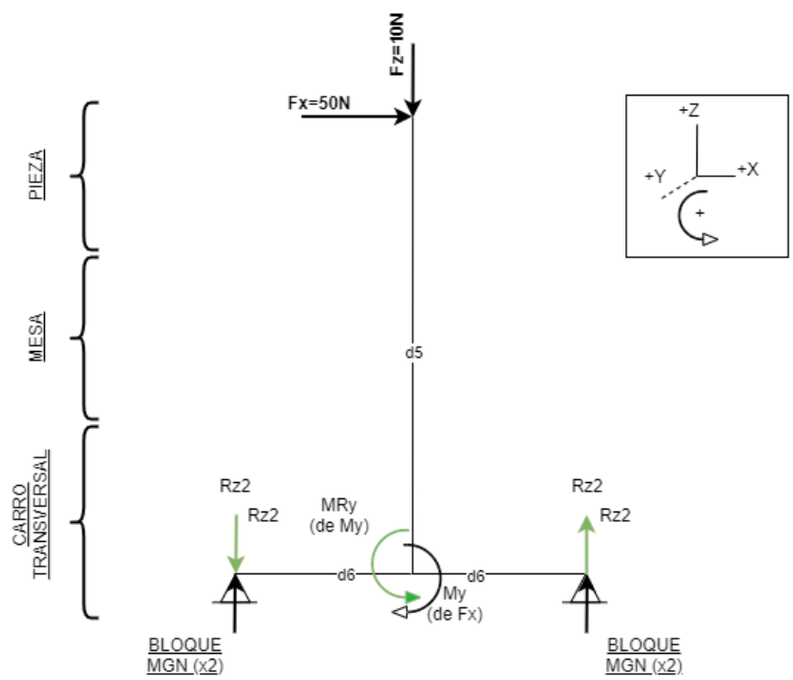
De esta manera, existe una fuerza lateral actuando en la punta del husillo que tiende a desplazar el Brazo lateralmente, siendo la Plataforma Z el centro de rotación. Otra fuerza actúa verticalmente en el husillo y tiende a elevar el Brazo, produciendo un momento de reacción al centro de la Plataforma Z.

Al mismo tiempo, estas mismas fuerzas se transmiten a los componentes que están por debajo del husillo, pero en sentido opuesto, encontrándose los centros de rotación de los momentos de reacción entre los apoyos deslizantes del Carro Transversal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-3. Diagrama de cuerpo libre plataforma Z



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-4. Diagrama de cuerpo libre Carro transversal

La figura 3-4 muestra el diagrama de cuerpo libre de la situación de los apoyos en la plataforma Z. Se pueden ver múltiples fuerzas de reacción actuando en los tres ejes de cada apoyo deslizante (Bloque MGN). La figura 3-5 muestra la situación de los apoyos en el Carro Transversal.

Desarrollando los diagramas de cuerpo libre de la Plataforma Z y el Carro Transversal, se obtienen las siguientes relaciones (Ver: ANEXO C: Desarrollo Diagrama de cuerpo libre):

$$Rx1 = \frac{12{,}5 * d1}{d2} \tag{20}$$

$$Ry3 = \frac{10 * d1 * d4}{(d4 - d1) * d2} \tag{24}$$

$$Ry1 = \frac{12{,}5 * d4}{d3} \tag{28}$$

$$Rz2 = \frac{12{,}5 * d5}{d6} \tag{32}$$

Con estas ecuaciones se pueden establecer las siguientes afirmaciones:

Según ecuación (20):

El ancho de la plataforma Z (d2) es inversamente proporcional a la fuerza de reacción en los bloques MGN. Es decir, se debe maximizar la distancia en el eje X de los bloques MGN.
El largo del husillo (d1) es directamente proporcional a la fuerza de reacción en los bloques MGN. Es decir, se debe minimizar la distancia entre el extremo del husillo y los bloques MGN.

Según ecuación (24):

El peso del brazo se puede considerar como el origen de (-Mx1), por lo tanto, se sumaría a Mx2, aumentando la magnitud del numerador. Esto significa que si aumenta el peso, aumenta la fuerza de reacción dependiendo proporcionalmente del largo del brazo y husillo. Lo mismo ocurre con la fuerza Fy, la cual se antepone a las fuerzas ascendentes de mecanizado y se suma a la fuerza peso.

Según ecuación (28):

El largo del brazo (d4) es directamente proporcional a la fuerza de reacción en los bloques MGN. Es decir, se debe minimizar.
El ancho de la plataforma Z (d3) es inversamente proporcional a la fuerza de reacción en los bloques MGN, es decir, se llega a la misma conclusión que el segundo párrafo de la conclusión de la ecuación (6).

Según la ecuación (32):

La distancia entre el carro transversal y la pieza a mecanizar (d5) es directamente proporcional a las fuerzas de reacción en los bloques MGN y la separación de estos es inversamente proporcional. Por lo tanto, se debe minimizar la altura de la mesa respecto a la plataforma y/o maximizar la separación de los bloques MGN.

3.3. PARTES ESTANDARIZADAS

3.3.1. Husillo

El husillo o "Spindle" es el elemento que entrega la fuerza motriz para girar la fresa. Los husillos utilizados comúnmente para máquinas fresadoras de bajo costo integran un porta herramientas unido al eje del motor. Además, existe una alta estandarización de estos elementos en el mercado, por lo que su elección es bastante sencilla.

Para seleccionar un husillo adecuado, se debe definir la potencia máxima de consumo que será requerida, en Watt.

La potencia (P), en Watt, se puede expresar como el producto entre el torque (T), en Nm, y la velocidad angular (ω), en $[\frac{rad}{s}]$ (Budynas, 2019)

$$P = T \times \omega \tag{33}$$

Se sabe que 1 revolución por segundo equivale a 2π radianes por segundo, de la siguiente manera;

$$\frac{rev}{s} = \frac{2\pi Rad}{s} \tag{34}$$

Convirtiendo a minutos:

$$\frac{rev}{min} = \frac{2\pi Rad}{60s} \tag{35}$$

Entonces la potencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$P = \frac{T \times n}{9{,}55} \tag{36}$$

Donde n equivale a revoluciones por minuto.

Se sabe que la fuerza de corte máxima será de 50N, el diámetro máximo de la fresa a utilizar será de 3mm y la velocidad máxima 18000RPM. Entonces, reemplazando en la ecuación:

$$\frac{50 \times 0{,}003 \times 18000}{9{,}55} = P \tag{37}$$

$$282{,}72\ [W] = P \tag{38}$$

Fuente: es.aliexpress.com

Figura 3-5. Husillo de 500W con porta herramienta y pieza de acople

Por lo tanto el motor debe ser de al menos 283 Watt de potencia. Se sabe por experiencia que los factores de seguridad típicos recomendados por los fabricantes para motores eléctricos rondan desde 1,25 hasta 2,25. Por tratarse de una máquina sujeta a condiciones de esfuerzo variables pero no extremas, se considera apropiado establecer un factor de seguridad de 1,7. Así, la potencia requerida será de 500W

El motor que cumple con las características necesarias es un modelo estándar producido por distintos fabricantes del sector de máquinas CNC de bajo costo y DIY.

Estos motores se conocen en el mercado como Motores "Spindle", ya que vienen con una toma de herramienta. Los más económicos son de carcasa cilíndrica, con escobillas y enfriados por aire. La información técnica para este tipo de motores más básicos es muy escasa.

Una de las desventajas más conocidas de este tipo de motores es su alto nivel de ruido al funcionar, y poca capacidad de enfriamiento. Debido a las condiciones calculadas anteriormente, se estima que esto último no debería ser problema con un motor de la potencia establecida.

3.3.2. Tornillos sinfín

Fuente: www.handsontec.com/dataspecs/linear%20motion/SFU1204-Ball%20Screw-Kit.pdf

Figura 3-6. Juego de transmisión SFU compuesta por diversos elementos

El movimiento rotacional de los motores de avance es transmitido a movimiento lineal mediante los tornillos sinfín, también llamados tornillos de potencia.

Existen principalmente dos tipos de tornillos de potencia para este tipo de aplicaciones en el mercado. En primer lugar, están los tornillos de rosca trapezoidal, en donde los más conocidos son los de rosca Acme y los de Rosca Trapezoidal Métrica. En segundo lugar, existen los de rosca circular, llamados tornillos de bolas.

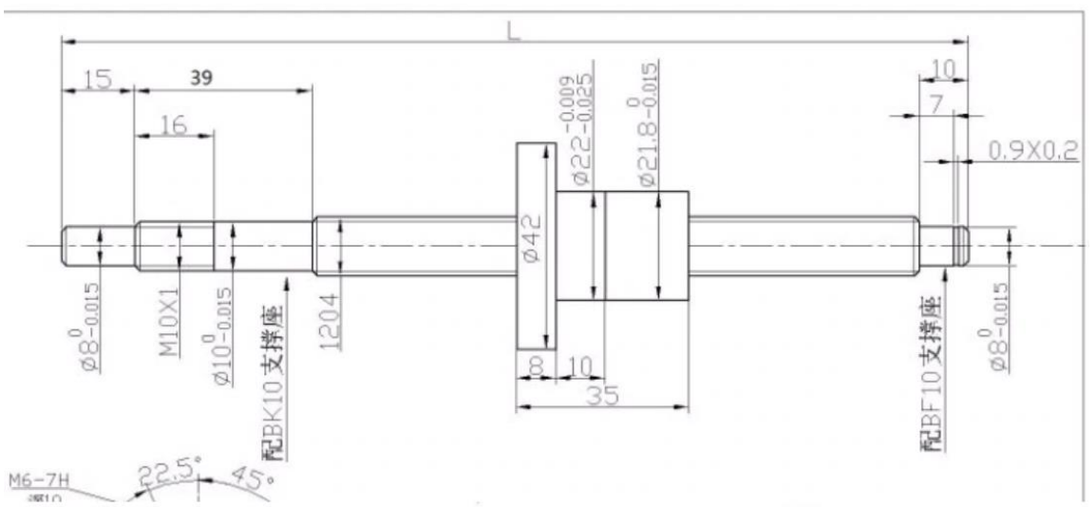
Estos últimos ofrecen un mejor desempeño en cuanto a vida útil y eficiencia, ya que presentan un coeficiente de fricción mucho menor que los de rosca trapezoidal, porque utilizan tuercas con bolas en su interior, a modo de rodamientos.

Esto hace que sean la opción preferible en aplicaciones que requieren una vida útil extendida y poca pérdida de energía entre el movimiento rotatorio y el movimiento lineal.

Se han escogido los tornillos de bolas debido a que su coeficiente de fricción estático es muy bajo, a diferencia de los de rosca trapezoidal. Esto hace que se pueda disponer de mayor fuerza útil de parte del motor al iniciar un movimiento. Además, la presencia de tornillos de bolas en un equipo es un importante indicador -aunque subjetivo- de calidad para el usuario objetivo.

Los tornillos de bolas estandarizados vienen con características específicas en los extremos para su montaje. Se pueden utilizar elementos de soporte estandarizados, codificados típicamente por letras como BK o BF, correspondiendo cada uno a un extremo específico del tornillo. Dichos soportes incluyen un anclaje roscado con un rodamiento de empuje para un extremo, y un anclaje de apoyo simple con rodamiento radial para el extremo opuesto. Además, muchos distribuidores incluyen un bloque de soporte estándar para la tuerca. Todos estos elementos permiten que se pueda incorporar todo el conjunto como un solo elemento en la máquina, lo cual entrega versatilidad en la línea productiva, en el mantenimiento y la posibilidad de personalización por parte del usuario final.

Debido a las características mencionadas, el desplazamiento útil de un tornillo de bolas es menor a su largo total. En el esquema siguiente se pueden ver las dimensiones de un tornillo de bolas de las características escogidas, donde L corresponde a la longitud total:



Fuente:www.aliexpress.com/store/5123086?spm=a2g0o.detail.1000002.2.31c01a27LtiQtB

Figura 3-7. Especificaciones dimensionales tornillo SFU1204

El tornillo escogido se identifica como SFU1204 en su clasificación más simple, el cual está caracterizado según normativas DIN, cuyas características más generales son:

Diámetro externo: 12mm
Paso: 4mm
Longitud: 300mm

3.3.3. Motores de avance

Los motores de avance son los elementos que producen el trabajo necesario para desplazar los distintos ejes y entregar movimiento a la máquina. Los motores paso a paso o stepper, por su nombre en inglés, entregan una alta estandarización y buen desempeño, además de vasta información disponible de manera libre, lo cual los hace la opción más adecuada para este trabajo. Uno de los motores stepper más utilizados actualmente en el campo de la automatización están regulados por la Asociación Nacional de Manufactureros Eléctricos, o NEMA, por sus siglas en inglés.

Para seleccionar un motor NEMA, se debe conocer el torque que se requerirá.

El torque necesario para mover una fuerza F aplicada a la tuerca de un tornillo sinfín, se puede calcular mediante la siguiente fórmula (Budynas, 2019):

$$T_R = \frac{F d_m}{2}\left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l}\right) \tag{39}$$

Donde:

T_R = Torque
F= fuerza axial externa = F mecanizado + F de aceleración + F roce gruías
dm = diámetro medio (Valor muy cercano al diámetro exterior)
l = paso = 4mm para tornillos de bolas SFU
f = coeficiente de fricción = entre 0,003 y 0,01 (HIWIN, HIWIN Ballscrews, technical information, 2020)

F aceleración = m*aceleración
F ac = 30kg*3m/s2
Fac = 90N

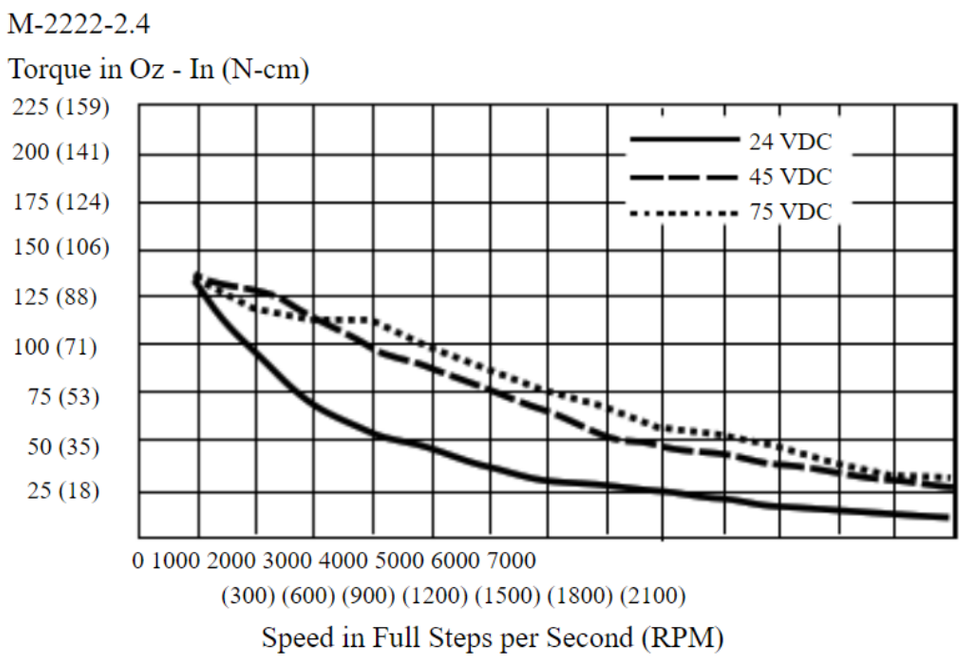
$$T_R = \frac{(50N + 2N + 90N) \times 12mm}{2}\left(\frac{4mm + \pi \times 0{,}01 \times 12mm}{\pi \times 12mm - 0{,}01 \times 4mm}\right) \tag{40}$$

$$T_R = 852Nmm\left(\frac{4{,}38mm}{37{,}64mm}\right) \tag{41}$$

$$T_R \approx 10Ncm \tag{42}$$

Como el valor calculado es para realizar una aceleración que será de la misma magnitud en el mecanizado y en la impresión 3D, es válido el cálculo para ambos casos.

El motor adecuado es el Nema23 2.4A (double stack), específicamente M-2222-2.4 según Schneider o 23HS5628 según manufactureros chinos, cuyo torque sigue la siguiente curva:



Fuente: motion.schneider-electric.com/hybrid-stepper-motor/m-23-nema-23-6-0-1-8-stepper-motor

Gráfico 3-1. Torque vs velocidad para motores Nema 23

Con el motor trabajando a 3000 RPM, se dispone de un torque aproximado de 11Nm y se logra una velocidad lineal de avance de 1200mm/min o 200mm/s, lo cual resulta suficiente para un proceso de mecanizado y de impresión 3D.

En la impresión 3D se podría llegar a una mayor velocidad ya que se requiere menor fuerza, pero no se dispone de los datos suficientes en el gráfico como para asegurarlo.

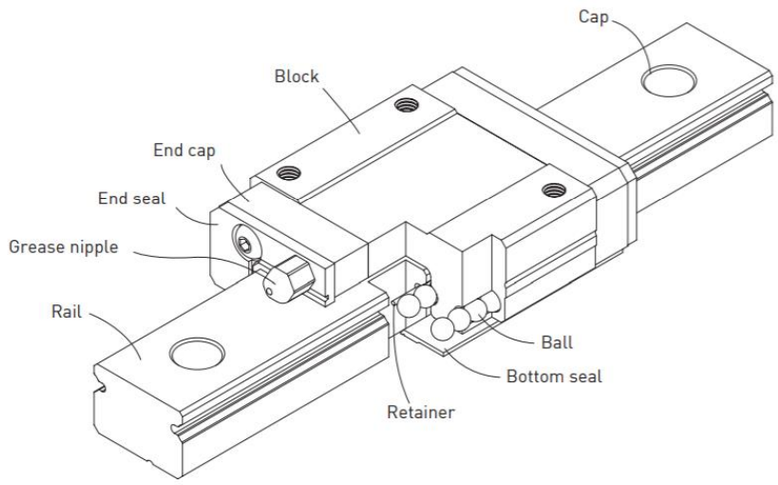
3.3.4. Guías lineales

Las guías lineales son los elementos lineales sobre los cuales se deslizan las partes móviles de la máquina. Se entiende que cuando se habla de las guías, se está haciendo referencia al conjunto riel-rodamiento lineal. Los rodamientos lineales, también conocidos como bloques, están especialmente diseñados para funcionar con un tipo de riel específico, por lo que se suelen proveer juntos. La documentación técnica suele estar enfocada sólo al bloque, debido a que es la parte más compleja y susceptible a fallas de las dos.

Para la selección de guías se identificó a uno de los proveedores más conocidos de componentes de maquinaria y, especialmente, de guías lineales y tornillos sinfín: HIWIN. Esta empresa ofrece la serie de guías lineales MG, entre las cuales se puede identificar la serie MGN.

Según el fabricante, la serie MGN cumple las siguientes características:

1) Pequeño y de bajo peso. Apropiado para equipos pequeños.
2) Todos los materiales para el bloque y el riel, incluyendo las bolas y elementos de retención, son de acero inoxidable de grado especial para evitar la corrosión.
3) El diseño de contacto de arco gótico puede resistir cargas desde todas las direcciones y ofrecer alta rigidez y precisión.
4) Las bolas están aseguradas en su lugar por un sistema de retención para prevenir que se caigan incluso si los bloques son removidos del riel.



Fuente: Catálogo HIWIN de guías lineales, serie MG

Figura 3-8. Riel MGN

Existen nueve modelos en la serie MGN. Para decidir cuál es el más apropiado se identificaron las magnitudes de las cargas máximas que deberá soportar en la máquina.

Según el punto 3.2, Diagrama de cuerpo libre, se identificaron las siguientes ecuaciones que describen los esfuerzos y distancias en los apoyos deslizantes de la máquina (ecuaciones 20,24,28 y 32):

$$Rx1 = \frac{12{,}5 * d1}{d2}$$

$$Ry3 = \frac{10 * d1 * d4}{(d4 - d1) * d2}$$

$$Ry1 = \frac{12{,}5 * d4}{d3}$$

$$Rz2 = \frac{12{,}5 * d5}{d6}$$

A continuación, se definen las dimensiones que tendrá la máquina para reemplazar en las ecuaciones, según dimensiones del diagrama de cuerpo libre Plataforma Z y Carro transversal.

Tabla 3-1. Dimensiones de la máquina

Dimensión	**Valor (m)**	**Descripción**
d1	0,14	Largo del husillo
d2	0,034	½ Alto de plataforma
d3	0,08	½ Ancho de plataforma
d4	0,16	Largo del brazo
d5	0,06	Altura mesa respecto a la estructura
d6	0,08	½ Distancia entre apoyos del Carro Transversal

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando las dimensiones declaradas anteriormente en las ecuaciones 6,7, 8 y 9, se obtienen las siguientes fuerzas de reacción en los apoyos deslizantes:

$$Rx1 = \frac{12{,}5 * 0{,}14}{0{,}034} = 51{,}47[N] \tag{43}$$

$$Ry3 = \frac{10 * 0{,}14 * 0{,}16}{(0{,}16 - 0{,}14) * 0{,}034} = 329{,}41\ [N] \tag{44}$$

$$Ry1 = \frac{12{,}5 * 0{,}16}{0{,}08} = 25\ [N] \tag{45}$$

$$Rz2 = \frac{12{,}5 * 0{,}06}{0{,}08} = 9{,}38\ [N] \tag{46}$$

La siguiente tabla describe las fuerzas de reacción para una interpretación rápida. Referirse, sin embargo, a los diagramas de cuerpo libre al inicio de este capítulo para mayor detalle.

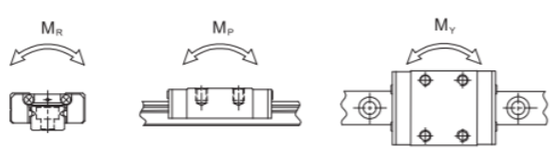
Tabla 3-2. Fuerzas de reacción

Dimensión	Valor (N)	Descripción
Rx1	51,47	Fuerza lateral en cada apoyo de la plataforma Z
Ry3	329,41	Fuerza frontal en cada apoyo de la plataforma Z
Ry1	25	Fuerza frontal en cada apoyo de la plataforma Z
Rz2	9,38	Fuerza vertical en cada apoyo del Carro Transversal

Fuente: Elaboración propia.

Como los bloques MGN cumplen la función de los apoyos deslizantes, las magnitudes de las fuerzas no deben exceder la carga máxima especificada para los bloques MGN. En la siguiente tabla se pueden observar dichas especificaciones:

Tabla 3-3. Dimensiones y cargas máximas recomendadas para rieles MGN



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)			Dimensions of Block (mm)										Dimensions of Rail (mm)							Mounting Bolt for Rail	Basic Dynamic Load Rating	Basic Static Load Rating	Static Rated Moment			Weight	
	H	H_1	N	W	B	B_1	C	L_1	L	G	G_n	Mxl	H_2	W_R	H_R	D	h	d	P	E	(mm)	C(kN)	C_0 (kN)	M_R N-m	M_P N-m	M_Y N-m	Block kg	Rail kg/m
MGN5C	6	1.5	3.5	12	8	2	-	9.6	16	-	Ø0.8	M2x1.5	1	5	3.6	3.6	0.8	2.4	15	5	M2x6	0.54	0.84	2	1.3	1.3	0.008	0.15
MGN7C	8	1.5	5	17	12	2.5	8	13.5	22.5	-	Ø1.2	M2x2.5	1.5	7	4.8	4.2	2.3	2.4	15	5	M2x6	0.98	1.24	4.70	2.84	2.84	0.010	0.22
MGN7H							13	21.8	30.8													1.37	1.96	7.64	4.80	4.80	0.015	
MGN9C	10	2	5.5	20	15	2.5	10	18.9	28.9	-	Ø1.4	M3x3	1.8	9	6.5	6	3.5	3.5	20	7.5	M3x8	1.86	2.55	11.76	7.35	7.35	0.016	0.38
MGN9H							16	29.9	39.9													2.55	4.02	19.60	18.62	18.62	0.026	
MGN12C	13	3	7.5	27	20	3.5	15	21.7	34.7	-	Ø2	M3x3.5	2.5	12	8	6	4.5	3.5	25	10	M3x8	2.84	3.92	25.48	13.72	13.72	0.034	0.65
MGN12H							20	32.4	45.4													3.72	5.88	38.22	36.26	36.26	0.054	
MGN15C	16	4	8.5	32	25	3.5	20	26.7	42.1	4.5	M3	M3x4	3	15	10	6	4.5	3.5	40	15	M3x10	4.61	5.59	45.08	21.56	21.56	0.059	1.06
MGN15H							25	43.4	58.8													6.37	9.11	73.50	57.82	57.82	0.092	

Note : 1 kgf = 9.81 N

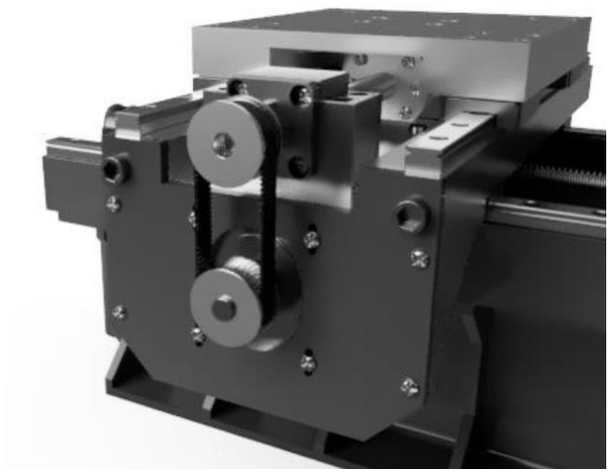
Fuente: Catálogo HIWIN de guías lineales, serie MG.

Se decidió que es adecuado que la carga real para los bloques de apoyo deslizante debe ser 10 veces superior a la carga para la cual están diseñados.
El bloque MGN que cumple con esta característica es el bloque MGN12H, el cual está calificado para cargas de 3,72kN, es decir, 11,2 veces superior a la carga esperada en la máquina.

Por lo tanto se justifica la utilización de bloques MGN12H y por consiguiente, rieles MGN12.

3.3.5. Correas

En todos los ejes el motor transmite la rotación hacia los tornillos de potencia por medio de correas y poleas dentadas. Las correas tienen una distancia entre centros de 56mm, un largo de 220mm y un ancho de 9mm.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-9. Correas

Las características de cada elemento son las siguientes:

Poleas:

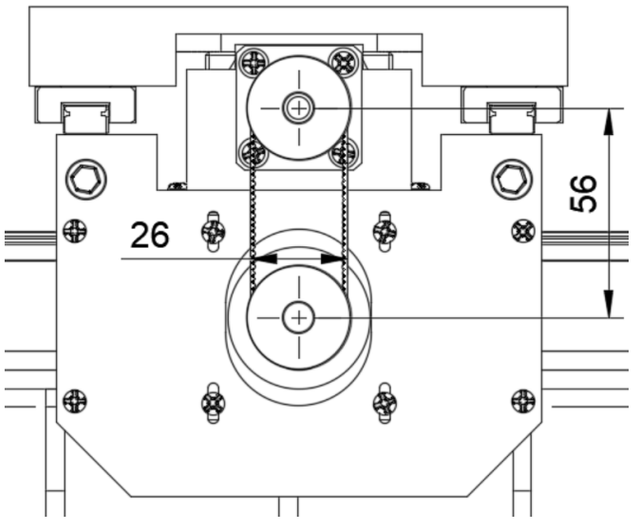
Tipo: Sincrónica
Denominación: HTD 3M 40T W10 8B
Perfil: HTD 3M
Dientes: 40
Ancho: 10mm
Diámetro de perforación: 8mm

Fuente:www.aliexpress.com/store/929682?spm=a2g0o.detail.1000002.2.6c2447c7QR8KlW

Figura 3-10. Polea dentada

Correas:

Denominación: HTD 3M 220 W9
Perfil: HTD 3M
Largo: 220mm
Ancho: 9mm



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-11. Distancia entre centro de las poleas

Fuente:www.aliexpress.com/store/4929033?spm=a2g0o.detail.1000061.1.6b5142025SmhGV

Figura 3-12. Correa

3.3.6. Fuente de poder

Se deben alimentar 3 sistemas principales: Motores para ejes, motor del husillo y calefacción.

Cada motor Nema23 está catalogado como motores de 2.4A, y la tensión escogida de alimentación es de 24V. Por lo tanto, tres motores trabajando de manera simultánea a su capacidad máxima significarían un consumo de 7,2A, a una tensión de 24V, son 172,8W de potencia.

A esto se le debe agregar la corriente consumida por el calefactor extrusor, cuya potencia típica oscila entre 30 y 60W.

El consumo de la electrónica es mínimo, por lo que el consumo debería ser de al menos 230W. Se le agregarán 100W al requerimiento de potencia por seguridad, quedando en 330W. El valor estandarizado de potencia más cercano es de 360W, por lo que la potencia será de 360W. Es preferible un modelo con ventilación forzada y protección por sobre-corriente.

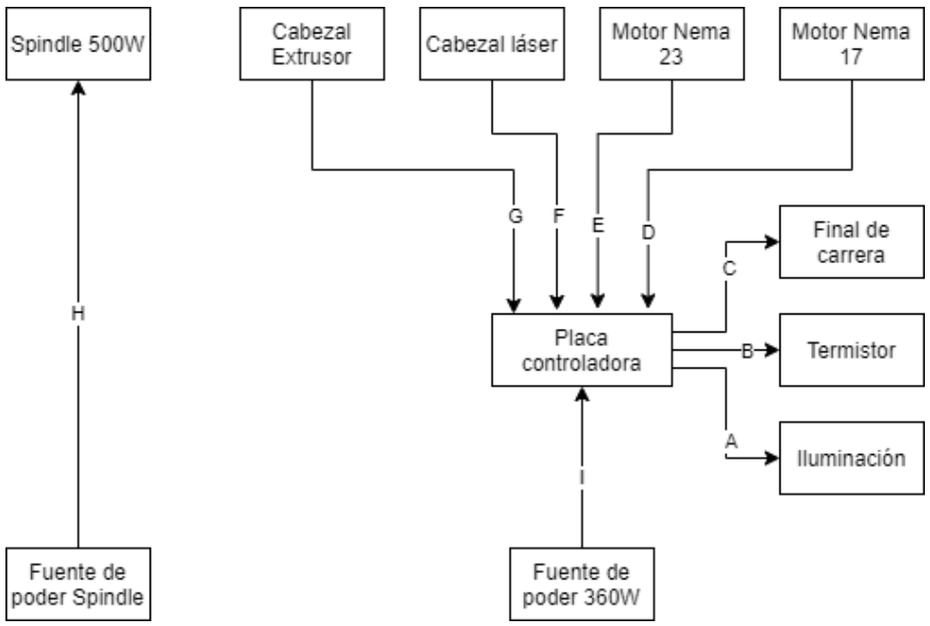
La energía para el spindle la entregará otra fuente de poder dedicada, la cual se adquiere junto al motor. Esta fuente de poder incluye un potenciómetro para regular la alimentación hacia el motor, y con ello, las revoluciones.

Fuente: es.aliexpress.com

Figura 3-13. Izquieda: Fuente de poder LED 350W, derecha: Fuente de poder "Spindle"

3.3.7. Cables

El tamaño de la sección transversal de los cables debe ser dimensionados de manera adecuada para transportar de manera eficiente y segura la corriente eléctrica, manteniendo un manejo y costos óptimos. A continuación se describen las rutas de conexiones, su carga estimada de corriente a conducir y el diámetro AWG sugerido según la normativa ASTM.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-14. Diagrama de rutas de cables eléctricos

Tabla 3-4. Calibres AWG según ruta

Ruta	Corriente de trabajo (A)	Calibre AWG recomendado (a 24V)	Tipo	N° de pines
A	0,2	23	Multifilar	2
B	0,1	23	350°C resist.	2
C	0,1	23	Multifilar	3
D	0,9	22	Multifilar	4
E	1	21	Multifilar	4
F	1	21	Multifilar	3
G	5	16	Multifilar	2
H	5	16	Multifilar	2
I	8,3	12	Multifilar	2

Fuente: Elaboración propia.

3.4. PARTES FABRICADAS

3.4.1. Estructura

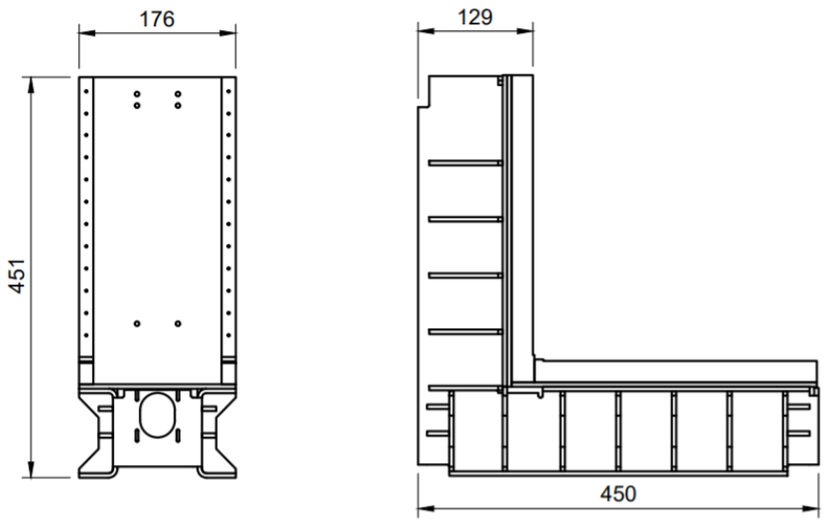
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-15. Render de la estructura

La estructura está conformada por una pieza principal llamada columna, la cual está conformada por dos partes plegadas en acero de 5mm, mas un elemento plano llamado plataforma en cada plano horizontal y vertical, y sobre cada uno de estos últimos, dos barras rectangulares de acero extruido llamados soportes de rieles MGN. Además, todo el conjunto está reforzado con elementos laterales llamados nervios, los cuales entregan mayor rigidez al conjunto, comunicando, al mismo tiempo, un aspecto de robustez hacia el usuario.

La geometría de la estructura está determinada por múltiples factores. En primer lugar se definió la forma en el diseño conceptual. En primer lugar, se definió un largo adecuado para el desplazamiento requerido por la mesa de trabajo. De igual manera, la altura se determinó por el recorrido necesario en el eje Z. El ancho y los espesores fueron establecidos, en primera instancia, por las restricciones de manufactura y experiencia, para luego corroborar y hacer ajustes detallados por medio de análisis de elementos finitos.
Finalmente, se agregaron características necesarias para acomodar los elementos mecánicos.

Los refuerzos laterales (Nervios) fueron introducidos al diseño exclusivamente gracias a las conclusiones obtenidas de los análisis de elementos finitos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-16. Dimensiones generales estructura

Para el proceso de diseñar o definir la forma de la columna, se eligió seguir un método en de tres pasos:

1) Definición de la forma mediante restricciones de manufactura
2) Definición de diagrama de cuerpo libre
3) Definición de forma mediante análisis FEA

La primera se refiere a definir las fuerzas que estarán presentes para aplicarlas en las siguientes etapas.
La segunda se refiere a establecer el proceso de manufactura para acotar las posibilidades de diseño desde el principio.
La tercera, se trata de definir las especificaciones técnicas finales en cuanto a dimensiones y espesores.

3.4.1.1. Análisis de restricciones de manufactura

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el plegado de chapa metálica aparece como el proceso más indicado para realizar la pieza estructural principal; la columna.

El ancho de las pestañas está directamente relacionado con las capacidades de la plegadora. El ancho de la pestaña tiene que ser suficiente para que no resbale de la matriz de plegado y las perforaciones que en ésta haya, deben estar lo suficientemente alejadas de la línea de plegado para que no sufran deformaciones. Lemaco SpA, sugiere en su Manual de Recomendaciones de Plegado (Lemaco, Recomendaciones plegado, s.f.) lo siguiente:

- El radio de plegado debiera, si es posible, mantenerse igual para todos los pliegues para minimizar cambios de herramientas
- Para la mayoría de los materiales, el mínimo radio interior debiera ser de al menos 1 espesor.
- La mínima pestaña debiera ser de al menos 4 veces el espesor del material más el radio de plegado. Al violar esta regla se puede causar distorsiones en la pieza o dañar las herramientas o al operador dado que las piezas resbalan de la matriz.
- Las ranuras o perforaciones que están muy cerca del pliegue se pueden deformar. Las perforaciones y ranuras deben estar al menos a una distancia de 3 veces el espesor más el radio de plegado desde la línea de plegado. Si se requiere de perforaciones más cercanas al plegado, éstas debieran extenderse más allá de la línea de plegado.

- El dimensionamiento de la pieza debe considerar la suma de tolerancias producto de sucesivos plegados. Las perforaciones para montaje de piezas debieran ser diseñadas de preferencia como oblongos.
- Las piezas deben ser inspeccionadas estando restringidas de movimiento para evitar que la flexión natural de las piezas afecte las mediciones. Las medidas interiores deben ser tomadas lo más cerca posible del plegado.

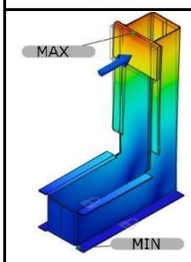
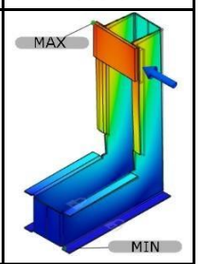
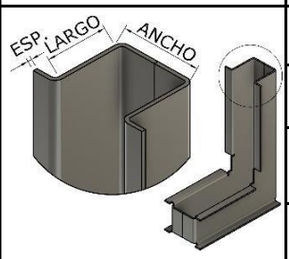
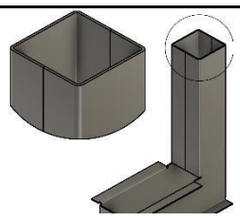
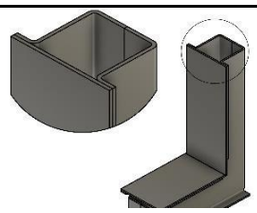
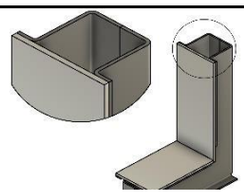
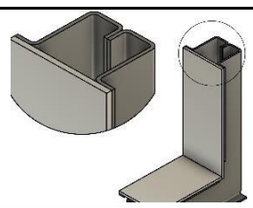
3.4.1.2. Análisis mediante elementos finitos

El análisis de elementos finitos permite el diseño de máquinas respecto a requerimientos mecánicos, siempre y cuando se tenga definida de forma exacta la estructura y las dimensiones de los componentes.
Dentro del diseño de una máquina herramienta, se puede utilizar para determinar la rigidez estática y modos de vibración (H. Chanal, 2006).

3.4.1.3. Análisis estático

En primer lugar, se acotó el universo de posibles geometrías definiendo 4 conceptos estructurales más detallados que el definido en el capítulo 2, modelándolos y aplicándoles un análisis estático de esfuerzos FEA con las mismas magnitudes y parámetros a cada uno, para finalmente compararlos en la siguiente tabla. Todo esto sólo para ayudar a definir la geometría más conveniente basándose en la deflexión. No para definir las medidas finales.

Tabla 3-5. Comparación de alternativas conceptuales

Concepto	**Imagen de referencia**	**Variación** [IMPORTANTE: *Todos los conceptos se derivan de las medidas del concepto A: 100mm de ancho por 100mm de largo de columna (ver imagen concepto A)*]	**Desplazamiento máximo (mm) producido por fuerza de 215N**	
			Frontal	**Lateral**
				
A		Espesor 5mm	0.03174	0.1344
		Espesor 5mm + 10mm de ancho	0.03231	0.1209
		Espesor 5mm + 10mm de largo	0.02568	0.1356
		Espesor 5mm + refuerzo interno	0.02590	0.1089
B		Espesor 5mm	0.02000	0.04165
		Espesor 3mm	0.03000	0.09763
C		Espesor 3mm con placas de 5mm de acero	0.01782	0.02743
		Espesor 5mm con placas de 5mm de acero	0.01263	0.01826
D		Espesor 3mm con placas de 8mm de aluminio	0.01866	0.03155
		Espesor 5mm con placas de 8mm de aluminio	0.01345	0.02125
E		Espesor 5mm con placas de 8mm de aluminio	0.01369	0.02098

Fuente: Elaboración propia.

El concepto D aparece como el que logra mejor comportamiento para su geometría.

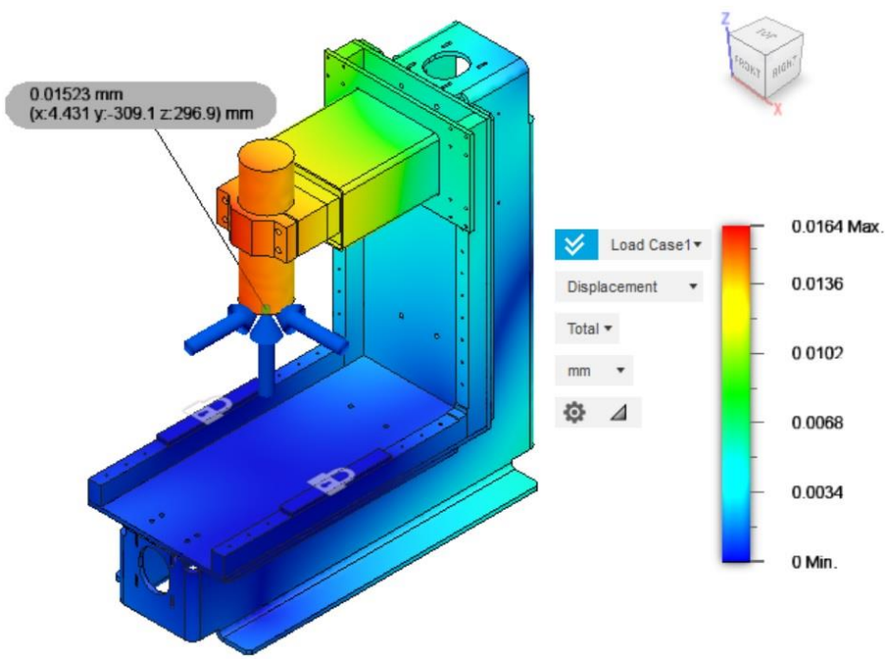
En segundo lugar, con el concepto óptimo ya definido, se procedió a modelarlo tridimensionalmente de acuerdo a los requerimientos de diseño declarados en el capítulo 2.

Para el análisis, tomando en consideración el diagrama de cuerpo libre general presentado con anterioridad, se ha concluido que es más adecuado analizar la estructura utilizando todos los principales elementos que transmiten las fuerzas hacia la columna, para así poder recrear de manera más precisa todos los momentos producidos por el sistema.

Cabe destacar que este es un proceso iterativo en el cual se recibe el feedback de los resultados y con ellos se rediseña el modelo, repitiendo el procedimiento múltiples veces hasta conseguir una apreciación satisfactoria de resultados.

Restricciones de costo: max. $80.000
Restricciones de operación: Precisión mínima de 0.016mm, traducido en una deflexión máxima de 0.016mm según figura (tanto)
Restricciones de fabricación: Plegado de placa metálica.

Los resultados son los siguientes:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-17. Análisis estático

La figura 3-18 muestra el resultado de un análisis de cargas estáticas según los desplazamientos máximos esperados. Las zonas de color azul representan los lugares con un desplazamiento cercano a cero. El desplazamiento máximo, en color rojo, se encuentra localizado en el husillo y su valor es de aproximadamente 0,016mm.

3.4.1.4. Análisis dinámico

Cuando un objeto es sometido a cargas repetitivas, se puede producir un movimiento oscilante conocido como vibración. Si la frecuencia de aplicación de dicha carga es igual o cercana a alguna de las frecuencias naturales propias del objeto, se producirá una vibración mayor a la esperada (Tippens, 2016). Este fenómeno se conoce como resonancia y es conocido por producir fallas críticas en sistemas mecánicos como fatiga, exceso de ruido, pérdida de eficiencia, entre otros. En máquinas herramientas, las vibraciones pueden generar un mecanizado defectuoso (Kelly, 2012). Por este motivo es que es esencial realizar un análisis de vibraciones como parte inherente del diseño de una máquina, con el objetivo de eliminar la vibración o al menos reducirla tanto como sea posible (Adebayo, 2010).

El análisis dinámico realizado consiste en dos etapas: conocer las frecuencias naturales de la máquina, y el desplazamiento máximo para cada una.

Con esta información se puede realizar un proceso iterativo de rediseño, el cual puede seguir indefinidamente o hasta lograr resultados satisfactorios en cuanto a las necesidades de funcionamiento, costo y juicio del diseñador.

El análisis de modos normales indica las frecuencias de resonancia de la máquina y su forma. El análisis de respuesta de frecuencia directa indica la magnitud máxima de los desplazamientos de las frecuencias de resonancia.

En este trabajo, ambos análisis se realizaron utilizando el software Inventor Nastran.

Las condiciones de los análisis fueron las siguientes:

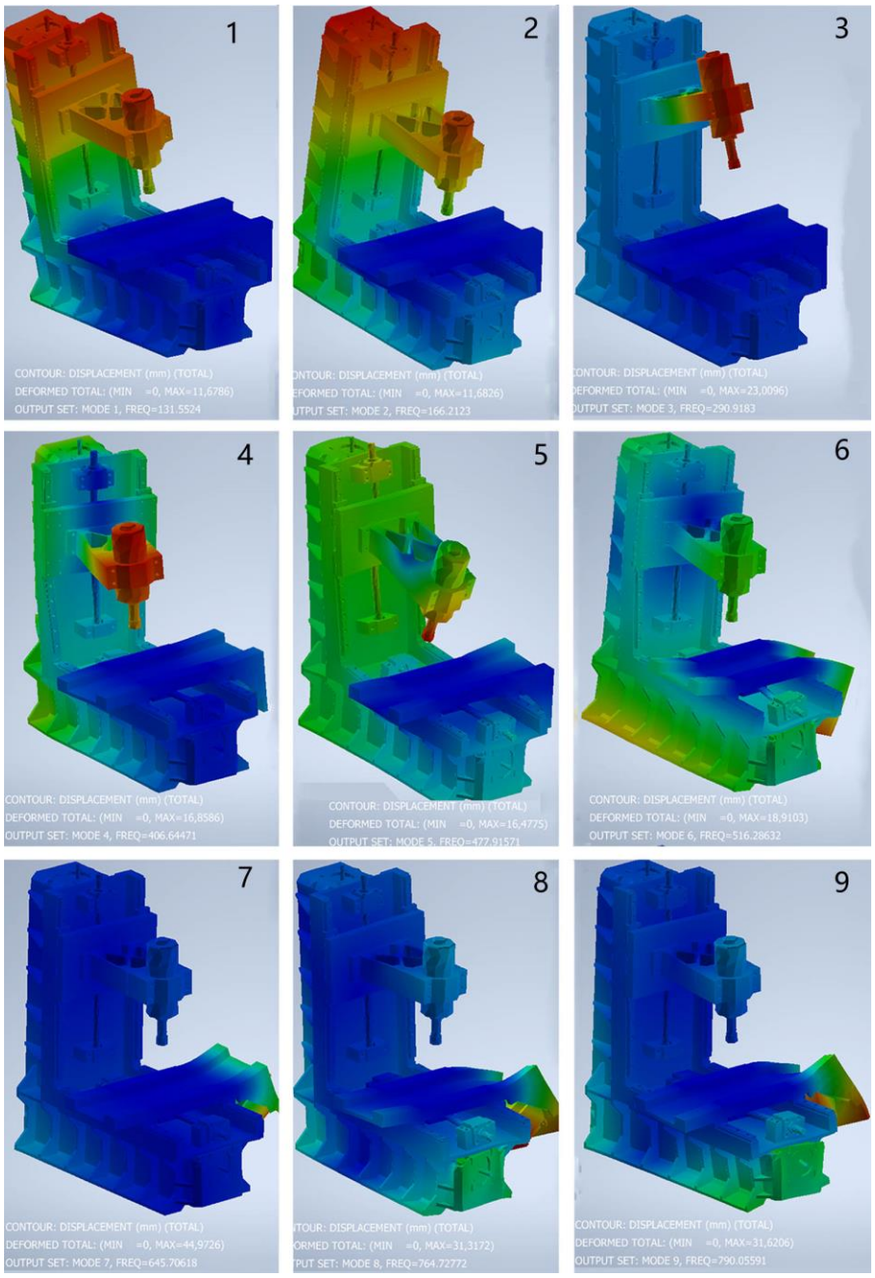
1) Análisis de modos normales:

   Restricciones de anclaje: en la cara superior del carro tranversal, con restricción total de traslación y rotación, separada 80mm del borde de cada estremo.
   Frecuencia mínima: 0Hz
   Número de modos: 10
   Materiales: Para todos los ensayos, acero de baja aleación para la estructura principal y aluminio para el brazo y el carro transversal. La plataforma Z varió entre aluminio y acero al carbono.

2) Análisis de respuesta de frecuencia directa:

   Carga Fx = 50N aplicada en la punta del spindle
   Carga Fy = 50N aplicada en la punta del spindle
   Carga Fz = 10N aplicada en la punta del spindle
   Restricciones de anclaje:
   Análisis 1,2 y 3: En la cara superior del carro tranversal, con restricción total de traslación y rotación, separada 80mm del borde de cada estremo.
   Análisis 4: Lo mismo que los anteriores pero agregando restricción de traslación de manera puntual en las cuatro esquinas más periféricas de la base.
   Frecuencia mínima: 0Hz
   Frecuencia máxima: 1000Hz
   Cantidad de puntos: 100
   Materiales: Para todos los ensayos, acero de baja aleación para la estructura principal y aluminio para el brazo y el carro transversal. La plataforma Z varió entre aluminio y acero al carbono.

El análisis de respuesta de frecuencia es un proceso que requiere una elevada capacidad de procesamiento y tiempo, por lo cual se simplificó el modelo tridimensional de la máquina al máximo, unificando todos los componentes similares como un solo cuerpo, para minimizar los contactos y excluyendo uniones de contacto amortiguadas para permitir un flujo de trabajo adecuado con las capacidades de procesamiento y tiempo disponibles.

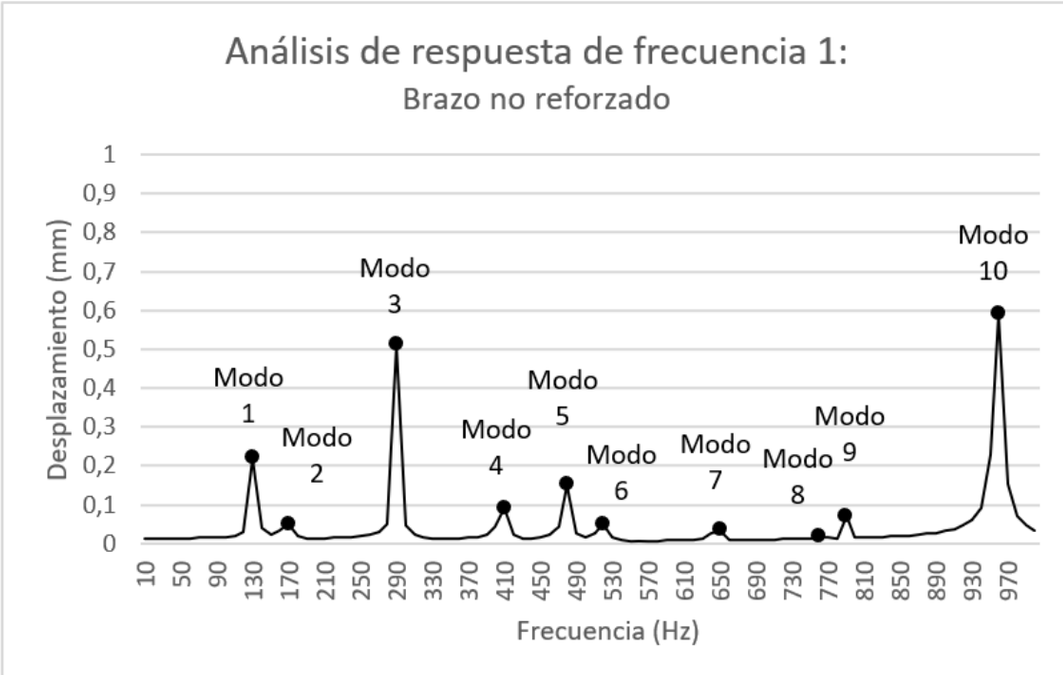


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-18. Análisis de modos “Brazo no reforzado”

Se inició el análisis con la hipótesis de que el brazo requerirá reforzamiento, por lo tanto la condición inicial del modelo a analizar se denominó “Brazo no reforzado”, para así tener un mayor orden y seguir un razonamiento más simple.

En el análisis de modos de la figura 3-19 no entrega ninguna información respecto a la amplitud de la vibración, sólo la forma específica de vibración de la estructura. Para poder tomar decisiones de diseño, se debe conocer el desplazamiento máximo que genera cada frecuencia de resonancia para así establecer si dicho modo o frecuencia representan o no un riesgo al funcionamiento. Esto último se logra con un análisis de respuesta de frecuencias, realizado también con Inventor Nastran (Ver gráfico 3-2).



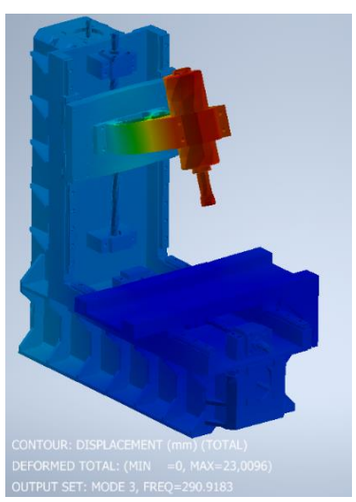
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-2. Análisis de respuesta de frecuencia 1. Condición "Brazo no reforzado"

El eje vertical indica la magnitud del desplazamiento máximo y el eje horizontal indica la frecuencia. Cada pico representa una frecuencia de resonancia y modo de vibración (ver figura anterior)

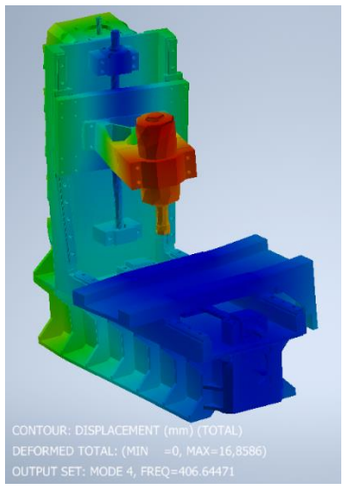
Se determinó que el rango de funcionamiento de la máquina será de 150Hz hasta 750Hz (fresa de 2 filos a 5000RPM, fresa de 3 filos a 15000RPM, respectivamente). Por lo tanto, a partir del gráfico anterior se puede ver que los modos 3, 4 y 5 se encuentran dentro del rango de funcionamiento y como presentan los desplazamientos más grandes, deben ser analizados con detalle:

Modos de frecuencias naturales para condición de brazo no reforzado:



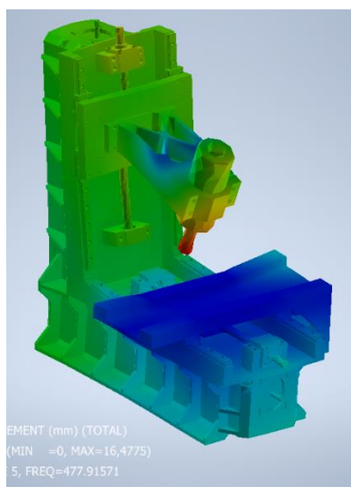
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-19. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 1: Modo 3



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-20. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 1: Modo 4

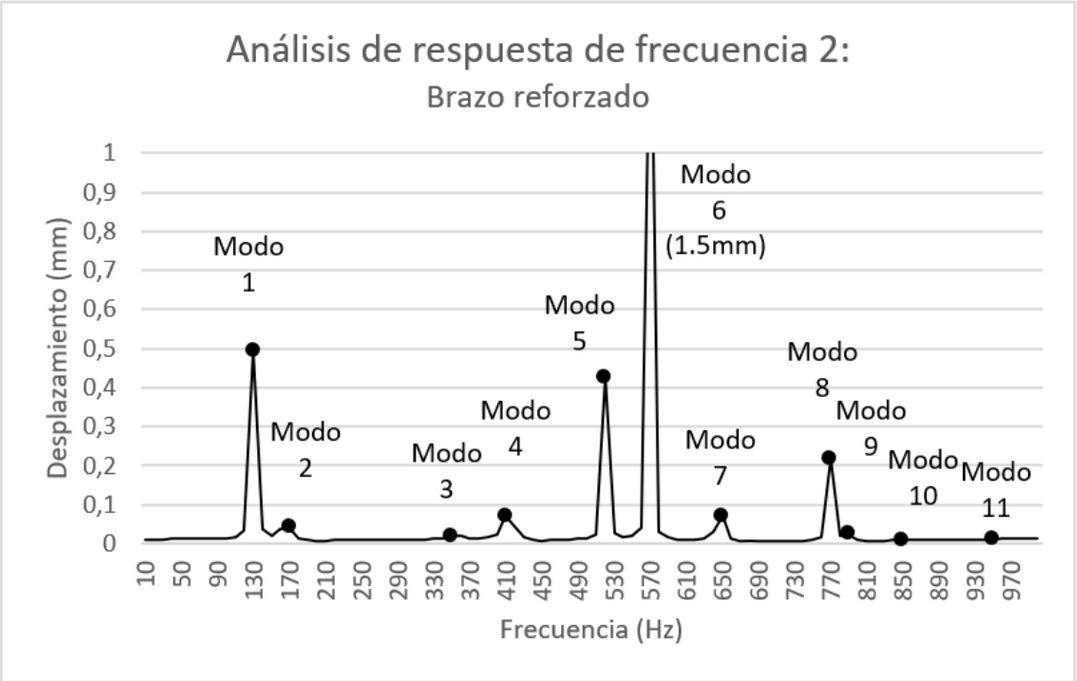


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-21. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 1: Modo 5

A partir de los modos de vibración de la figura se puede concluir claramente que el brazo del husillo debe ser reforzado para aumentar la rigidez para resistir movimientos de elevación y movimientos laterales. El modo 3 y el modo 5 presentan desplazamientos hacia arriba y hacia abajo, lo cual indica que se necesita rigidez en la parte media del brazo. El modo 4 indica falta de rigidez no solo en la plataforma Z, sino que también ante los esfuerzos de torsión en la base de la columna.

Reforzando el brazo según el razonamiento anterior, se obtienen estos resultados:

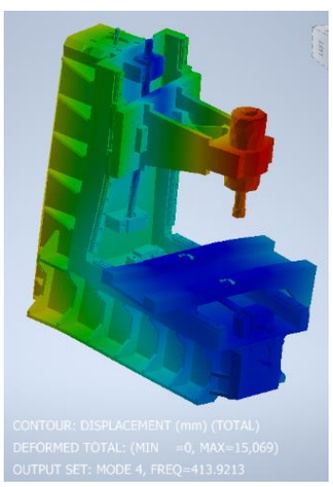


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-3. Análisis de respuesta de frecuencia 2. Condición "Brazo reforzado"

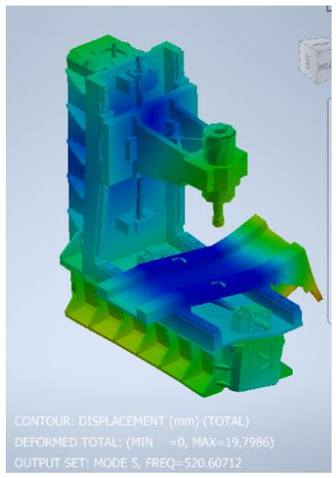
Ahora se pueden identificar tres modos que siguen requiriendo análisis: modo 4, 5 y 6.
Dichos modos son de la siguiente manera:

Modos de frecuencias naturales para condición de brazo reforzado:



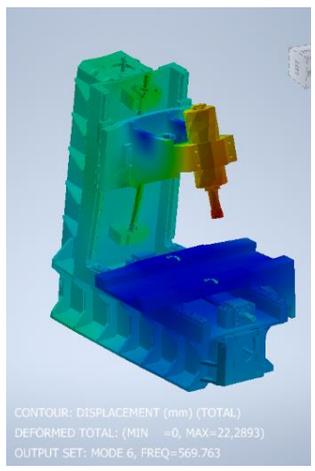
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-22. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 2: Modo 4



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-23. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 2: Modo 5



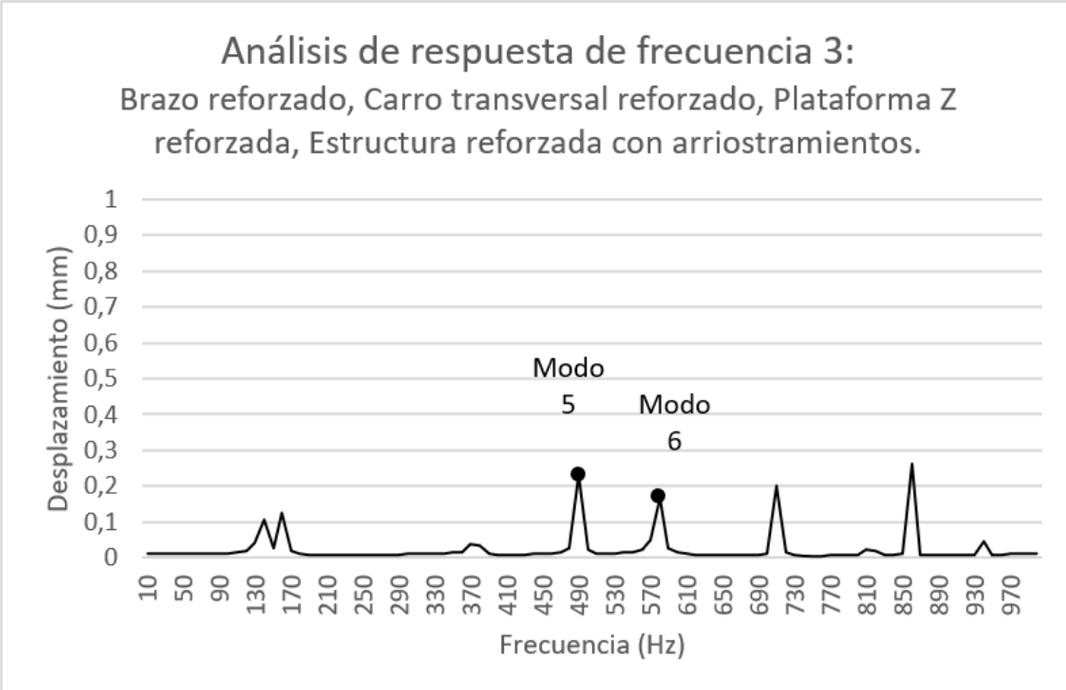
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-24. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 2: Modo 6

Esta vez se concluye lo siguiente:

El modo 4 indica que nuevamente falta más rigidez en la base de la columna. El modo 5 indica que falta rigidez en la plataforma. También indica que hay mucho peso en la parte derecha de la plataforma, pero eso no se puede cambiar mucho porque ahí va el motor que es estándar. El modo 6 muestra una flexión en la plataforma Z que sujeta el brazo, lo cual puede solucionarse reforzando esa pieza o modificando la geometría o cambiando el material a uno con mayor resistencia.

Se aplicaron los cambios declarados en el gráfico 3-4 y se obtuvieron los siguientes resultados:

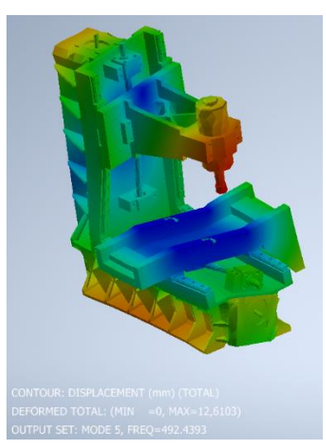


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-4. Análisis de respuesta de frecuencia 3. Condición "Múltiples partes reforzadas"

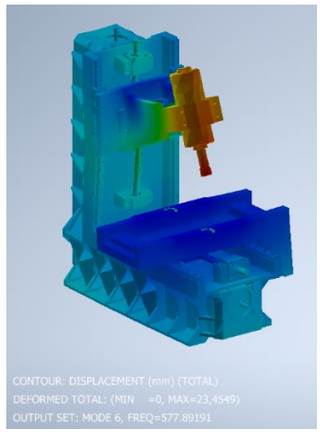
Con los resultados obtenidos se puede apreciar que siguen existiendo frecuencias de resonancia dentro del rango de funcionamiento pero de mucha menor amplitud.
Las frecuencias de resonancia que presentan un peligro para la máquina son 490Hz y 570Hz

Modos de frecuencias naturales de interés para condición de brazo reforzado, carro transversal reforzado, plataforma z reforzada y estructura reforzada con arriostramientos:



Fuente: Elaboración propia.

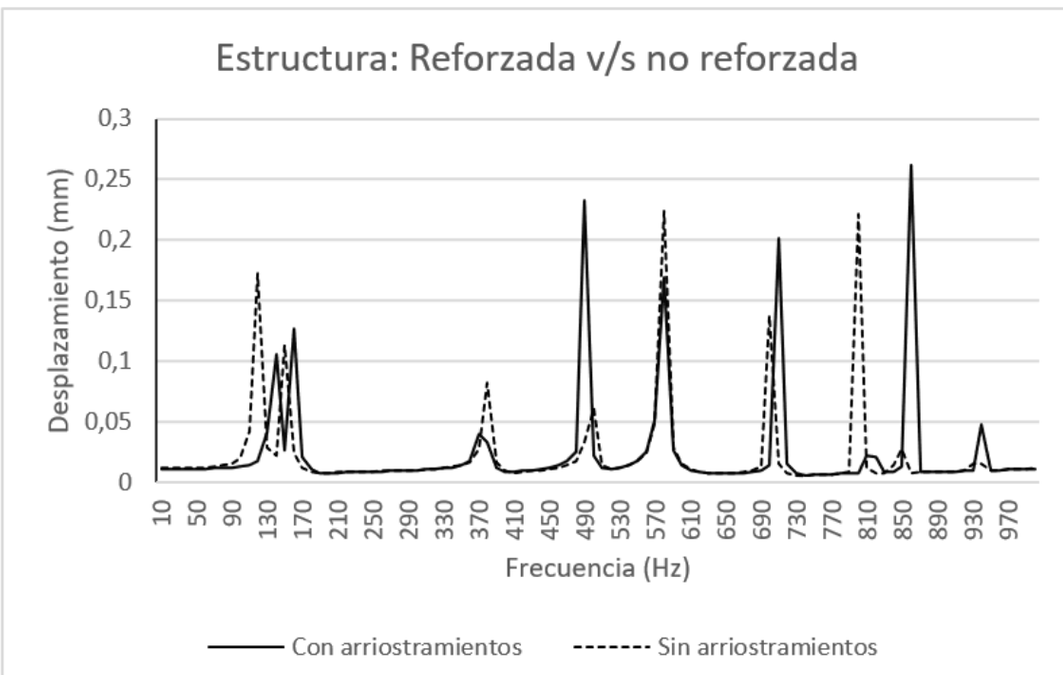
Figura 3-25. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 3: Modo 5



Fuente: Elaboración propia.

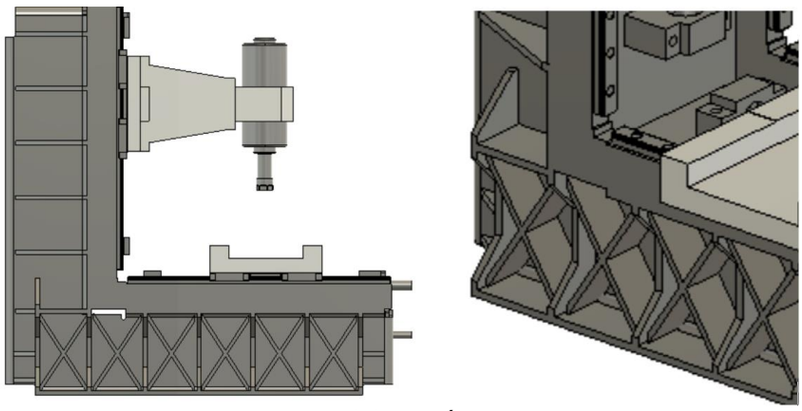
Figura 3-26. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 3: Modo 6

En esta etapa se descubrió que agregar arriostramientos para reforzar la base de la estructura es innecesario, ya que no tiene mayores efectos en disminuir la amplitud de las frecuencias de resonancia. Por lo tanto, lo que realmente tiene impacto es reforzar el carro transversal. El siguiente grafico muestra una comparación entre la estructura sin arriostramientos vs con arriostramientos en términos de desplazamientos máximos bajo las mismas condiciones de análisis:



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-5. Estructura reforzada con arriostramientos vs no reforzada

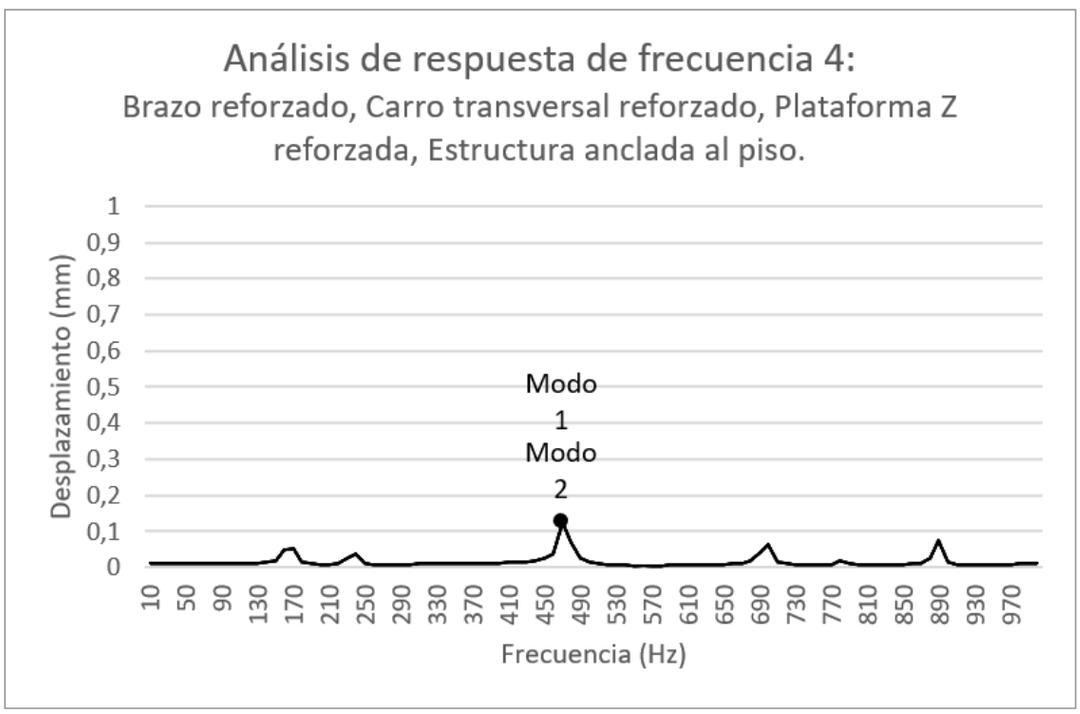


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-27. Arriostramientos estructurales

Para disminuir la frecuencia de resonancia del modo 5 se decidió que una opción adecuada y efectiva es anclar la estructura a una superficie sólida. Para disminuir el modo 6 simplemente se requiere reforzar el anclaje del spindle (motor husillo) con el brazo, para prevenir el momento de giro del sindle que se puede ver en la imagen.

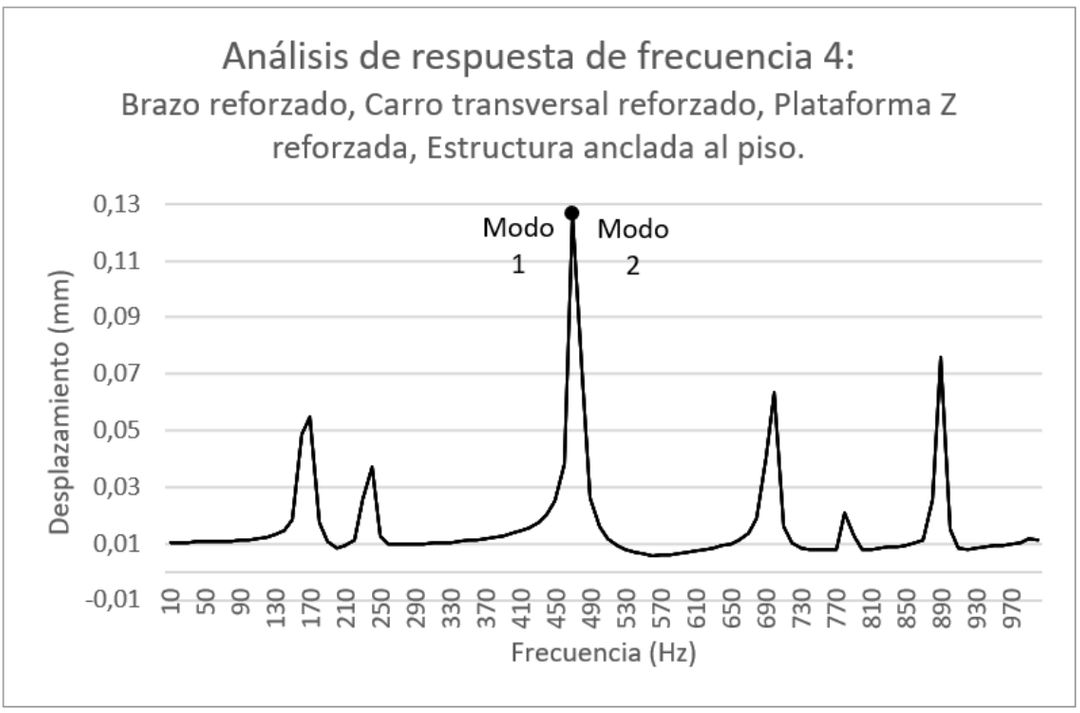
Con los cambios mencionados, es decir, anclando la estructura a una superficie sólida y removiendo los refuerzos diagonales, se obtienen los siguientes resultados:



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-6. Análisis de respuesta de frecuencia 4. Condición “Múltiples partes reforzadas sin arriostramientos y anclada al piso”

Mismo gráfico que el anterior pero con escala ajustada:

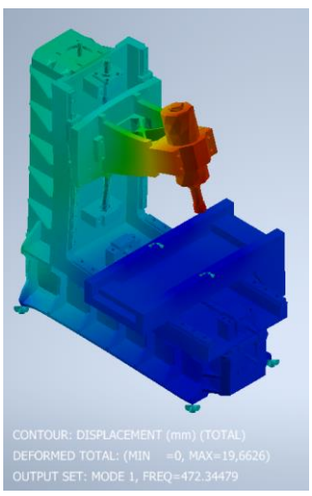


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-7. Análisis de respuesta de frecuencia 4. Condición "Múltiples partes reforzadas sin arriostramientos y anclada al piso", escala ajustada

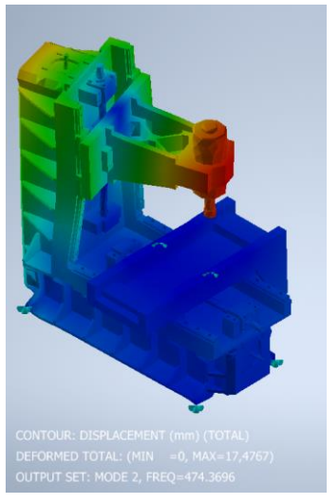
En donde, mediante un análisis modal, se pueden observar cómo se comporta la estructura en las frecuencias de resonancia con mayor magnitud de desplazamiento (472Hz y 474Hz) las cuales se encuentras muy próximas entre sí.

Modos de frecuencias naturales para condición de brazo reforzado, carro transversal reforzado, plataforma z reforzada y estructura anclada al piso:



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-8. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 4: Modo 1



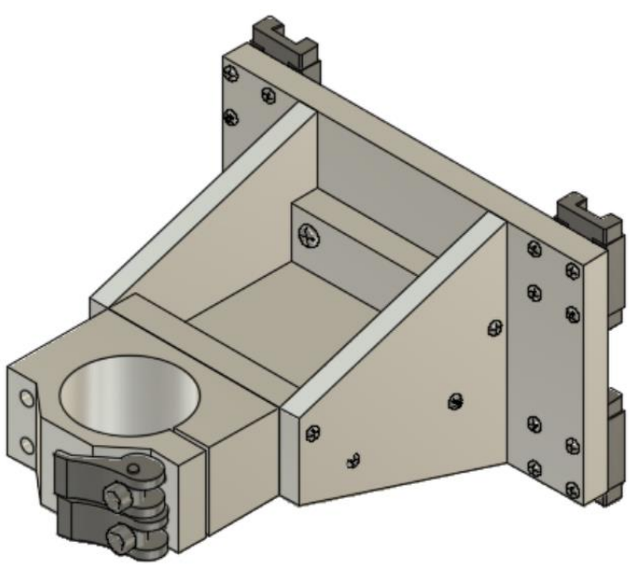
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3-9. Análisis de modos según condición de análisis de respuesta de frecuencia 4: Modo 2

Se ha concluido que este es el resultado óptimo porque se ha descubierto, según muestra el gráfico 3-5 que entregar la rigidez necesaria para disminuir más la amplitud de las resonancias de los modos 1 y 2 de los gráficos 3-6 y 3-7 es más costoso y complejo de lo esperado.

3.4.2. Conjunto Brazo Z

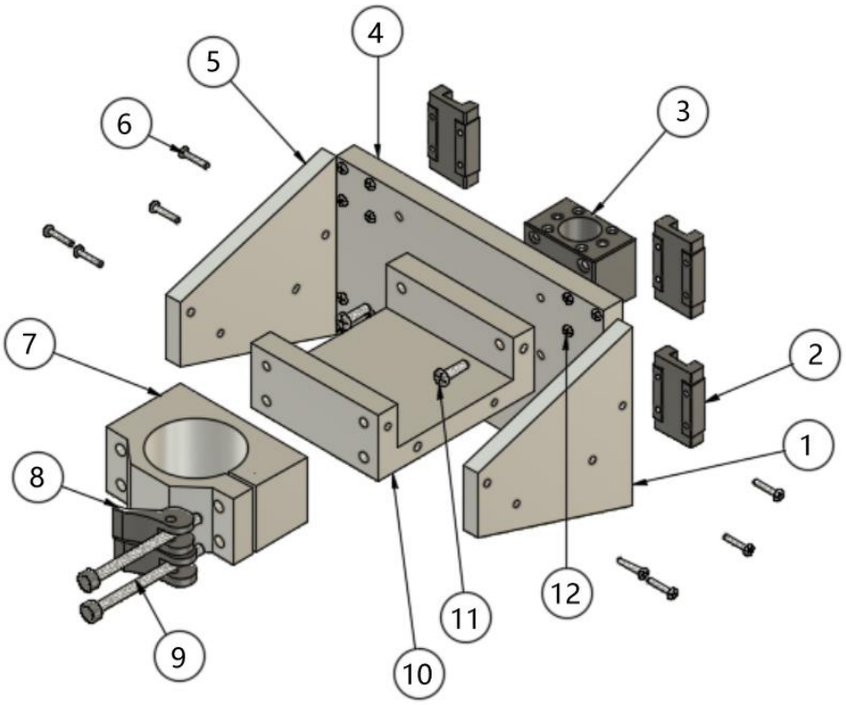
El conjunto brazo es la parte que soporta el cabezal de trabajo y se desplaza verticalmente en el eje Z. Las proporciones generales del brazo fueron definidas de acuerdo al tamaño de la mesa, la cual requiere un desplazamiento dos veces mayor a su propia dimensión. Las dimensiones y configuración fueron definidas mediante el análisis de elementos finitos descrito en el punto anterior a través de numerosas iteraciones (Ver: ANEXO D: Plano Brazo Z, ANEXO E: Plano , ANEXO F:)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-28. Conjunto Brazo

El brazo se compone de ocho elementos principales:

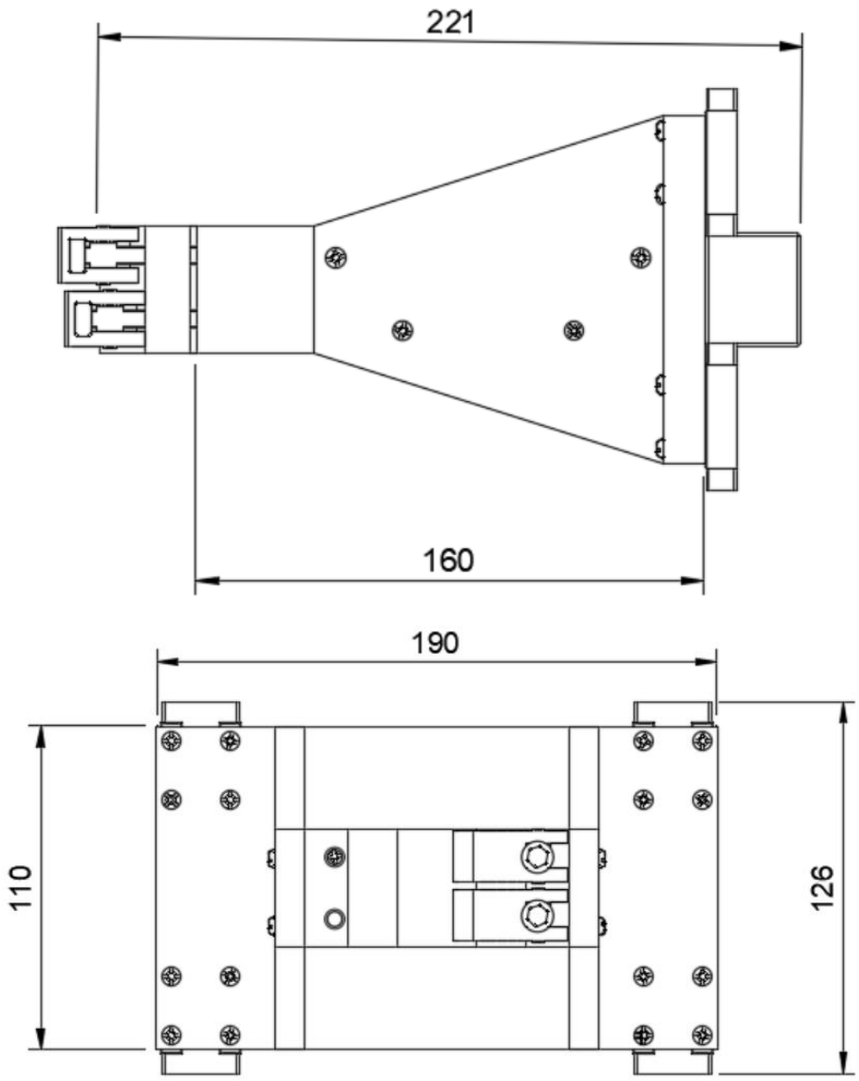


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-29. Despiece conjunto Brazo

1) Refuerzo derecho Brazo Z
2) Bloques MGN
3) Bloque de tuerca SFU
4) Plataforma Z
5) Refuerzo izquierdo Brazo Z
6) Pernos M4x16
7) Acople
8) Prensa de liberación rápida
9) Pernos M6
10) Brazo Z
11) Pernos M4x16
12) Pernos M3x16

Las partes están diseñadas para ser fabricadas en aluminio de aleación 3030 o de resistencia superior.

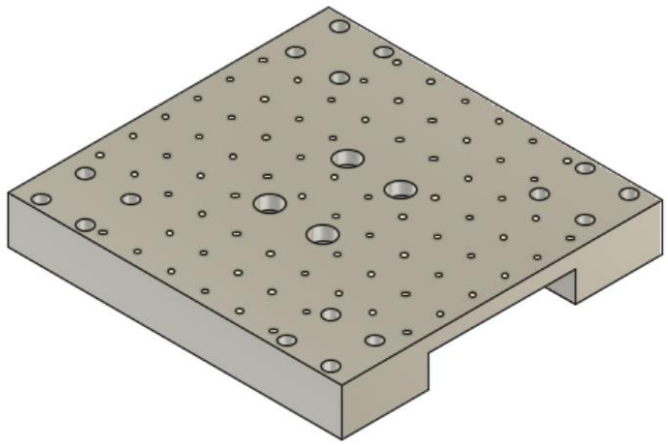


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-30. Dimensiones generales Conjunto Brazo

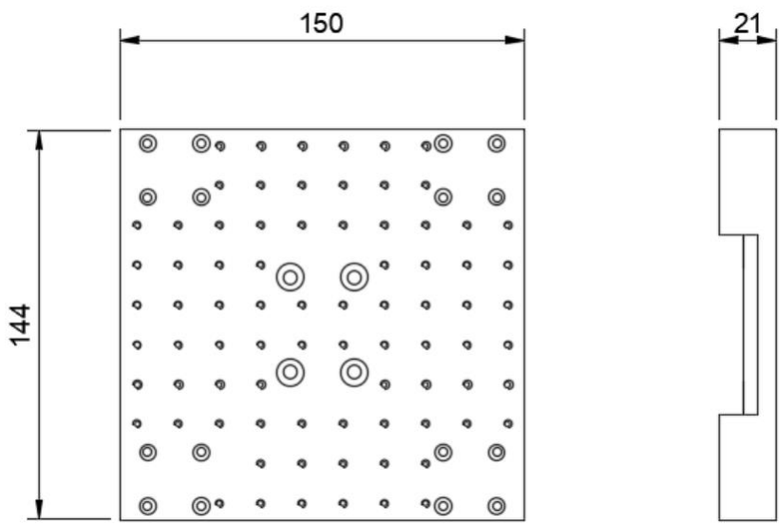
3.4.3. Mesa

Las dimensiones de la mesa están definidas por los requerimientos del usuario y el análisis de Benchmarking. Las dimensiones son: 150x150mm (Ver: ANEXO G: Plano M).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-31. Mesa



Fuente: Elaboración propia.

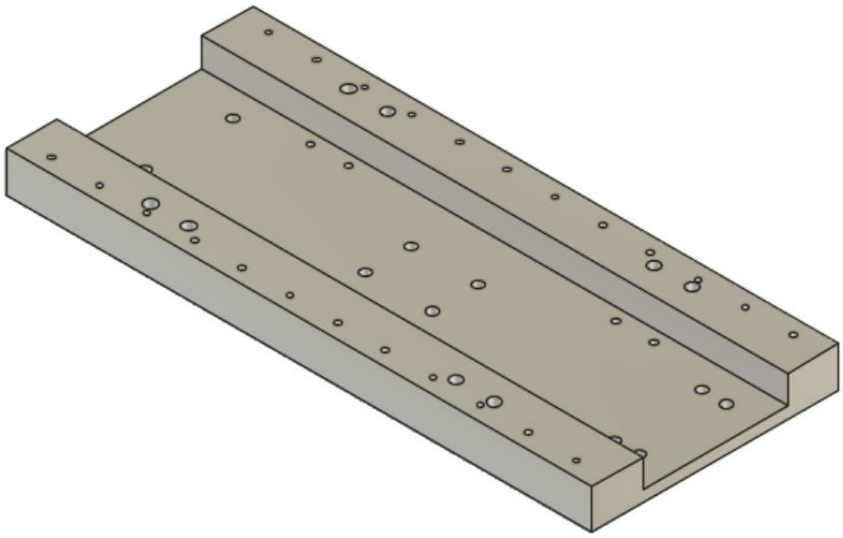
Figura 3-32. Dimensiones generales Mesa

La plataforma cuenta con perforaciones roscadas de 3mm que permiten anclar piezas a su superficie por medio de Step-Clamps. Las perforaciones están separadas por una distancia de 15mm aproximadamente.

Además, la plataforma cuenta con todas las perforaciones necesarias para montar los bloques MGN y Bloque de tuerca SFU.

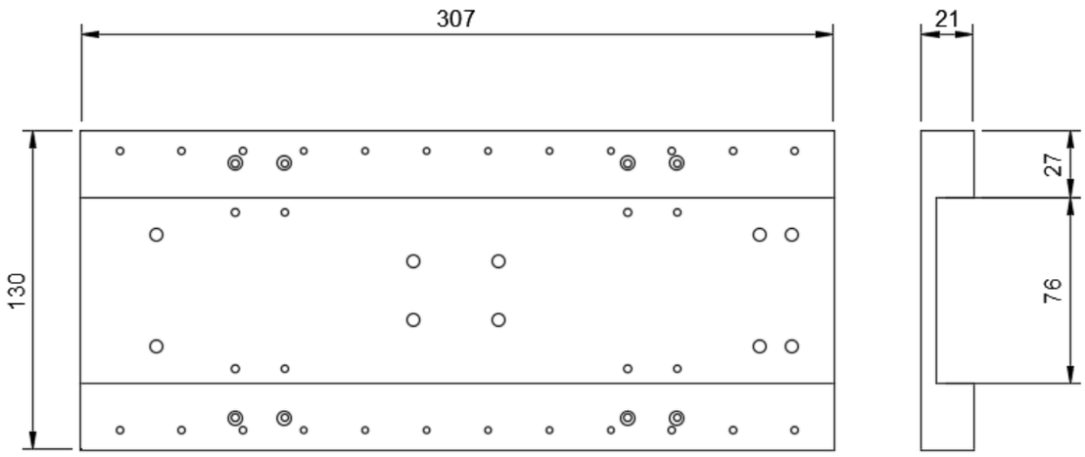
3.4.4. Plataforma Carro Transversal

La geometría de la plataforma carro transversal depende directamente de la mesa de trabajo. El ancho es similar al de esta última, y el largo es el doble, más una distancia extra que permite ajustarse al largo estándar en el cual se distribuyen los rieles MGN (Ver: ANEXO H:).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-33. Plataforma Carro Transversal

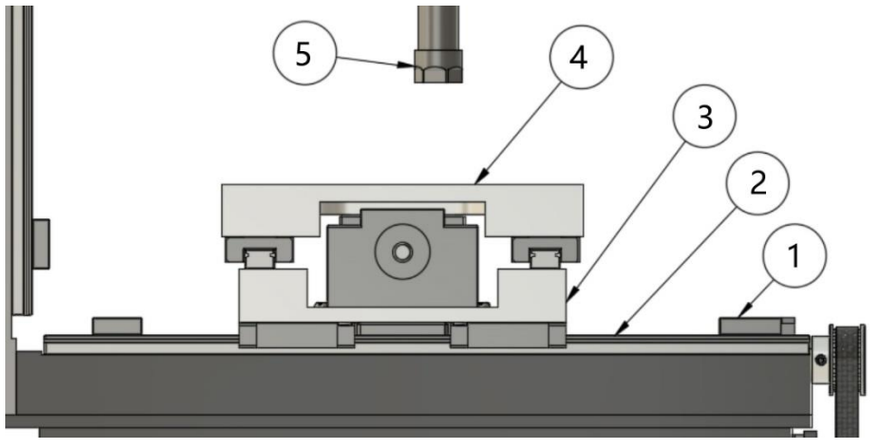


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-34. Dimensiones generales Plataforma Carro Transversal

La geometría, además, contempla el posicionamiento elevado de los rieles con respecto a los soportes BK y BF del tornillo de potencia, para su correcta nivelación. Está diseñado para ser fabricado en aluminio de aleación 3030 o superior.

A continuación se puede observar la disposición de la Plataforma Carro Transversal sobre la máquina.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-35. Disposición y componentes Plataforma Carro Transversal

1) Apoyo BK
2) Riel MGN
3) Plataforma Carro Transversal
4) Mesa
5) Spindle

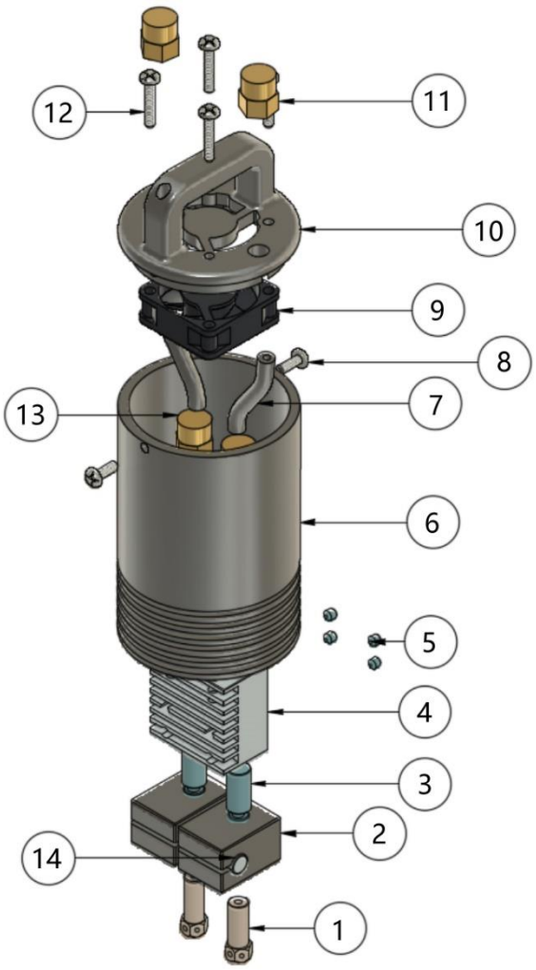
3.4.5. Cabezal extrusor

De tipo bowden, el cabezal extrusor se puede ensamblar directamente en el Acople gracias a su geometría cilíndrica. Se compone de una carcasa metálica de aluminio que ayuda a disipar el calor, un bloque extrusor Chimera dual en su interior y una tapa fabricada mediante un proceso de manufactura aditiva FDM en ABS con un ventilador que ayuda a evitar el sobrecalentamiento interno.

La tapa cuenta con una geometría que permite al usuario insertar y remover el cabezal de manera cómoda y segura.

Fuente: Elaboración propia.

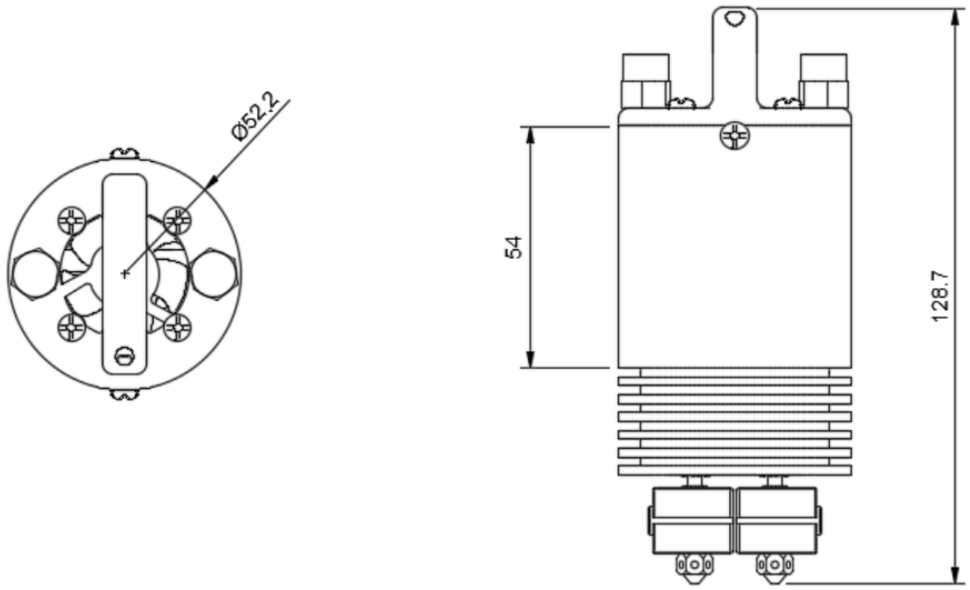
Figura 3-36. Cabezal extrusor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-37. Despiece Cabezal extrusor

1) Boquilla
2) Bloque calefactor
3) Garganta
4) Bloque disipador Chimera
5) Pernos prisioneros
6) Carcasa
7) Tubo de PTFE Ø2int. x 43mm
8) Pernos M3x8
9) Ventilador 24V
10) Tapa ABS
11) Acople de latón para tubos de PTFE con seguro
12) Pernos M3x16



Fuente: Elaboración propia.

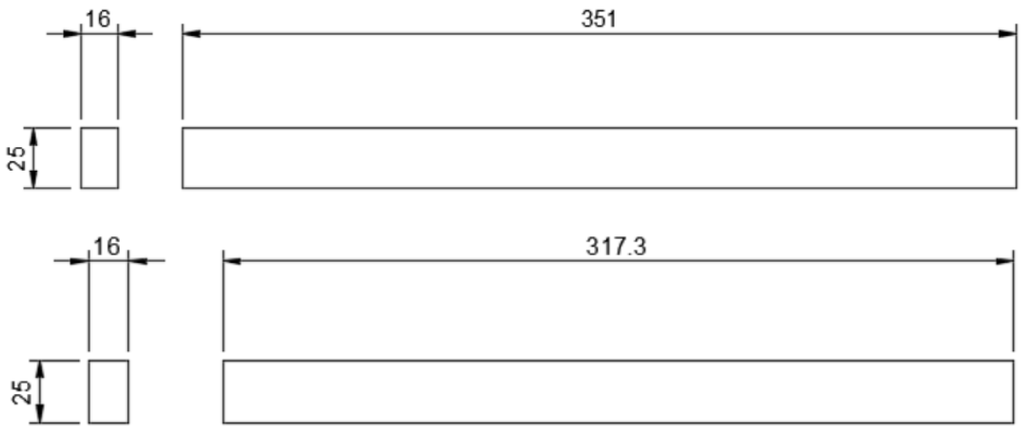
Figura 3-38. Dimensiones generales Cabezal extrusor

3.5. PROCESO DE MANUFACTURA

3.5.1. Definición de las tareas

1) Corte de barras

Se cortan las barras de acero a un largo de 317,3mm para los soportes horizontales de los rieles de la estructura y 351mm para los verticales. El alto puede variar entre 25 y 26mm. Cada máquina requiere dos soportes horizontales y dos verticales.



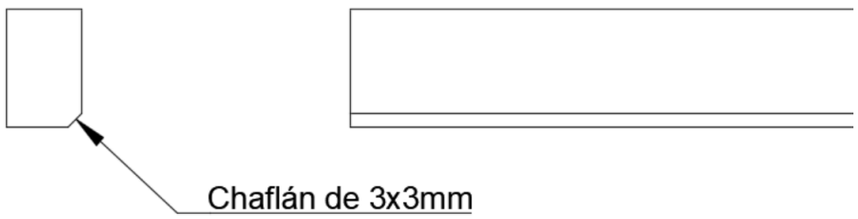
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-39. Dimensiones Soportes de riel MGN.

2) Desbaste estructura

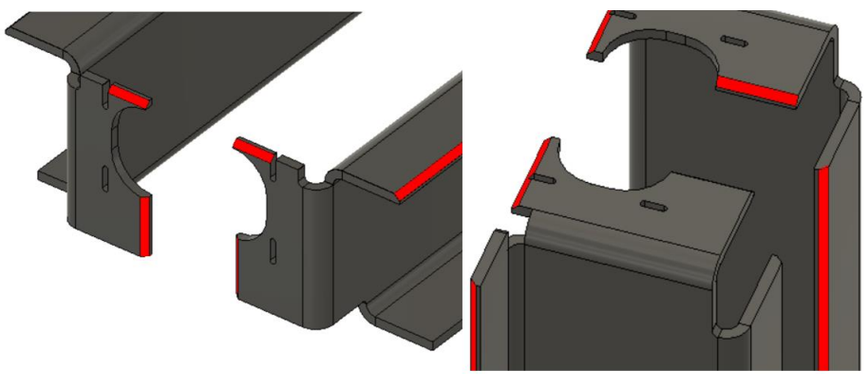
Se debe quitar material en algunos bordes para que posteriormente, la soldadura penetre de forma correcta entre las piezas a unir.

Se debe desbastar un borde en todos los soportes de rieles como se muestra en la figura. Es recomendable utilizar un esmeril de banco para las piezas pequeñas como los soportes y un esmeril angular para la columna que es de mayor peso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-40. Chaflán Soportes de riel MGN.



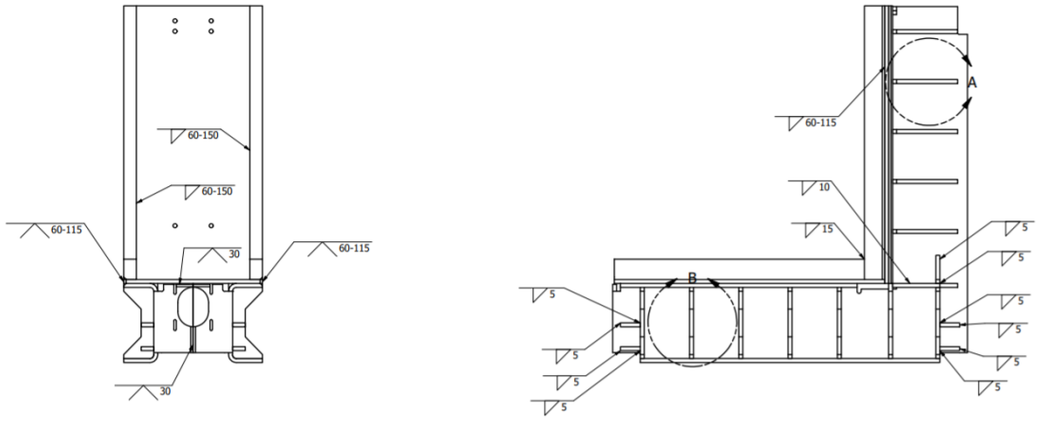
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-41. Desbaste de la pieza Columna.

3) Montaje y soldadura

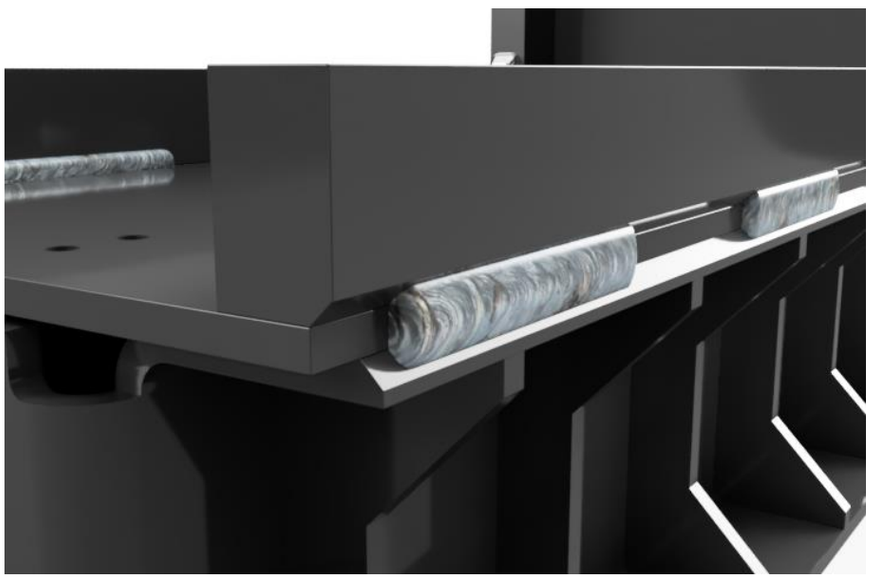
Una vez desbastados los bordes, se deben montar todas las partes en su lugar mediante prensas, a excepción de los nervios y soldar. Finalmente, se sueldan los Nervios posicionando uno a la vez. Puede ser conveniente, si se prefiere, fijar en su posición todos los nervios con un punto de soldadura, para luego soldarlos de forma definitiva. (Ver: ANEXO I: , ANEXO J:).

Es de suma importancia realizar las soldaduras de manera espaciada, de manera de distribuir lo más posible el calor homogéneamente en la pieza para evitar deformaciones excesivas y concentradas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-42. Parte de las especificaciones de soldadura estructura.

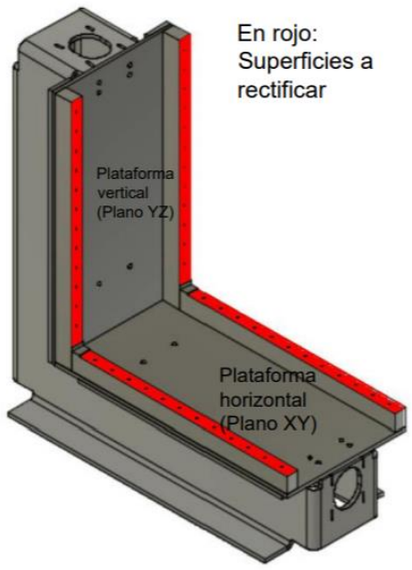


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-43. Render de soldadura en la estructura.

4) Rectificado

Es necesario rectificar los Soportes de rieles MGN para obtener paralelismo y rectitud entre los planos de trabajo. Esto, debido a que el proceso de plegado logra una precisión baja y el proceso de soldadura tiende a deformar ligeramente toda la estructura de manera poco predecible. (Ver: ANEXO K:).

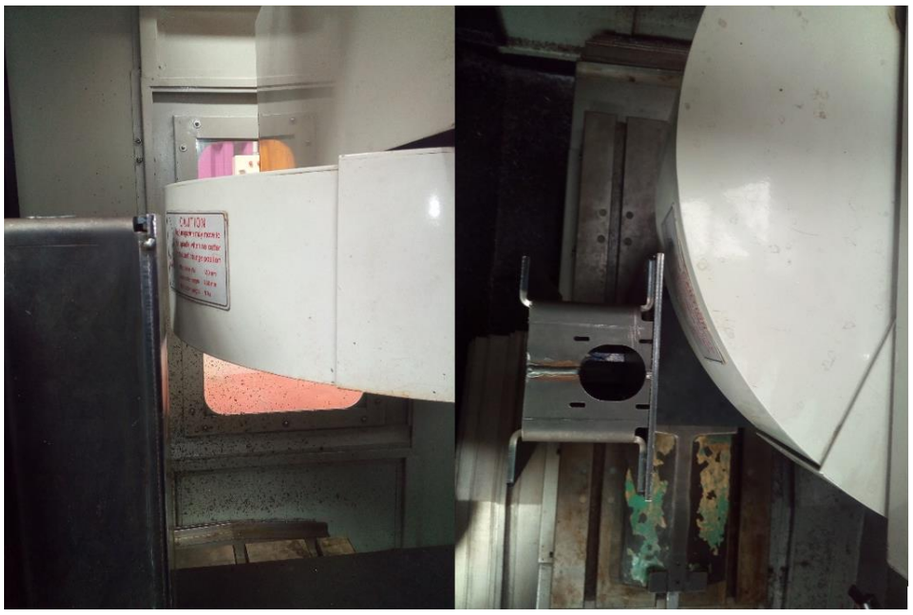


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-44. Superficies a rectificar.

Es preferible realizar el mecanizado mediante un proceso CNC para obtener mayor precisión y rapidez.

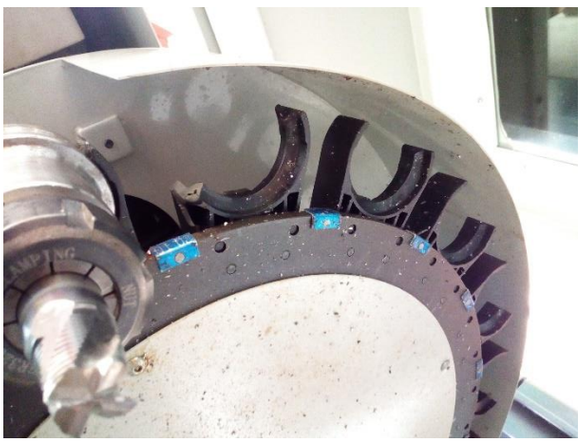
Se identifican tres momentos que pueden presentar dificultad en este proceso. Primero, las dimensiones de la máquina pueden alcanzar los límites dentro de un centro de mecanizado CNC, por lo tanto se debe tener extrema precaución con los elementos móviles internos de la máquina para evitar colisiones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-45. Cercanía de la Estructura montada al interior del centro de mecanizado con el carrusel porta-herramientas.

Segundo, se hace necesario el uso de una herramienta con un barrote el cual, debido a sus dimensiones, puede colisionar con herramientas adyacentes en el carrusel porta herramientas. Por este motivo, se debe evitar hacer cambios de herramienta automáticos, a menos que se tenga seguridad de poder realizarlo. Además, se recomienda realizar el cero máquina con la pieza desmontada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-46. Pinza del carrusel rota al colisionar el barrote de la herramienta adyacente.

En tercer lugar, el montaje y alineación de la pieza pueden requerir más esfuerzo que el esperado para otras piezas. La pieza, debido a su geometría, presenta deflexiones al anclarla a la mesa por medio de Step-Clamps o prensa. Estas deformaciones hacen que se pierda la alineación con relativa facilidad a medida que se aprieta el elemento de sujeción, especialmente si es una prensa.

La pieza, debido a su geometría, puede ser sujetada con bridas directamente a la mesa para mecanizar el plano XY, pero se necesita una prensa para sujetar en el

mecanizado del plano YZ, debido a que la parte vertical de la columna, a diferencia de la parte horizontal, carece de pestañas.

Además, la prensa genera un agarre relativamente inestable cuando no está apretada, por lo que hace del proceso de alineación una tarea que puede llegar a ser bastante impredecible y por consiguiente, compleja.

Por este motivo, se recomienda primero montar la pieza utilizando una prensa para mecanizar el plano YZ y después montar la pieza con step-clamps para mecanizar el plano XY, ya que en este último, al disponer de una superficie más estable, se pueden ir agregando separadores entre la mesa y la pieza para alinear de manera, aunque poco eficiente, más efectiva y simple.

Es importante agregar las siguientes consideraciones:

Al montar con bridas, fijarse que las pestañas estén apoyadas de tal manera que no se deformen al apretar. Si es necesario, agregar separadores entre la mesa y las pestañas. De esta manera, se evita que alguna pestaña desalineada pueda enderezarse temporalmente mientras se realiza el proceso de mecanizado y una vez que se suelta y desmonta la pieza, volver a su posición inicial, deformando toda la pieza y por consiguiente, deformando el plano recién rectificado.

Algunos separadores vienen con adhesivo, lo cual es muy conveniente ya que permite pegarlos de manera que mantengan su posición en la pestaña durante todo el proceso de alineación posterior, en donde se deberán ir agregando o quitando más separadores.

Se recomienda ubicar separadores entre la cara móvil de la prensa y la pieza para lograr mayor adhesión y prevenir que la prensa concentre la fuerza en un solo punto, lo que podría ocasionar falta de estabilidad en el agarre (ver imagen)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-47. Montaje de la Estructura sobre una prensa para rectificar plano YZ.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-48. Montaje de la Estructura mediante bridas para rectificar plano XY.

En el Anexo L (Ver: ANEXO L: Programa de planeado CNC) se puede ver un ejemplo de programa de planeado para un sistema Fanuc en un centro de mecanizado CNC vertical.

5) Perforado

Se deben realizar las perforaciones en los Soportes de riel MGN para los pernos de sujeción de los rieles. (Ver: ANEXO K:)

El proceso se puede realizar después de cada rectificado de los soportes de riel MGN de cada plano. Se debe considerar que con un portaherramientas convencional no se podrá alcanzar a realizar las perforaciones más cercanas al centro de la máquina debido a que la propia pieza es muy alta y puede colisionar con el portaherramientas o alguna parte del cabezal. Si este es el caso, las perforaciones faltantes deberán realizarse de forma manual.

6) Roscado

Se deben roscar las perforaciones de los soportes de riel MGN (Ver: ANEXO K:)

El proceso puede realizarse de forma manual o dentro del proceso de mecanizado.

7) Arenado y pintado

El tratamiento superficial de la estructura de acero es importante por dos razones. Primero, le entrega al producto un valor estético que lo hace mucho más atractivo al cliente. En segundo lugar, protege el material de la corrosión, la cual, en caso contrario, podría llegar a generar fallos prematuros de la máquina.

Al nivel estético del producto diseñado se le asignó un valor importante. Por este motivo, se ha optado por entregar un acabado superficial óptimo.

Debido a las características del proceso, tales como, requerir infraestructura, maquinaria, certificaciones y capacitación adecuadas, se ha decidido que externalizar este proceso es más conveniente para lotes pequeños de producto.

8) Ensamble componentes electrónicos

Se deben montar los componentes electrónicos que van sobre la estructura, tales como motores del eje Z e Y y finales de carrera de dichos ejes. (Ver: ANEXO M:)

9) Armado de transmisiones

Las transmisiones se distribuyen en juegos conformados por el tornillo sinfín, su tuerca, el bloque de tuerca, los bloques BK y BF y anillos de retención.

10) Ensamble carro transversal

(Ver: ANEXO M:)

11) Ensamble brazo Z

(Ver: ANEXO M:)

12) Ensamble cabezal

(Ver: ANEXO M:)

13) Ensamble unidad de control

(Ver: ANEXO M:)

14) Ensamble de todos los componentes

(Ver: ANEXO M:)

3.5.2. Estimación de tiempos de manufactura

Tabla 3-6. Estimación de tiempos de manufactura

Tarea	**Duración (horas)**
Corte de barras	0,10
Desbaste estructura	0,10
Desbaste nervios	0,30
Soldadura	1,00
Rectificado	8,00
Perforado	0,50
Roscado	1,00
Tratamiento superficial	8,00
Montaje componentes electrónicos	0,50
Limpieza y armado de transmisiones	3,00
Ensamble carro transversal	0,50
Ensamble brazo Z	0,50
Ensamble cabezal	0,50
Ensamble unidad de control	2,00
Ensamble de todos los componentes	2,00
Calibración	5,00
Empaque y almacenamiento	0,11

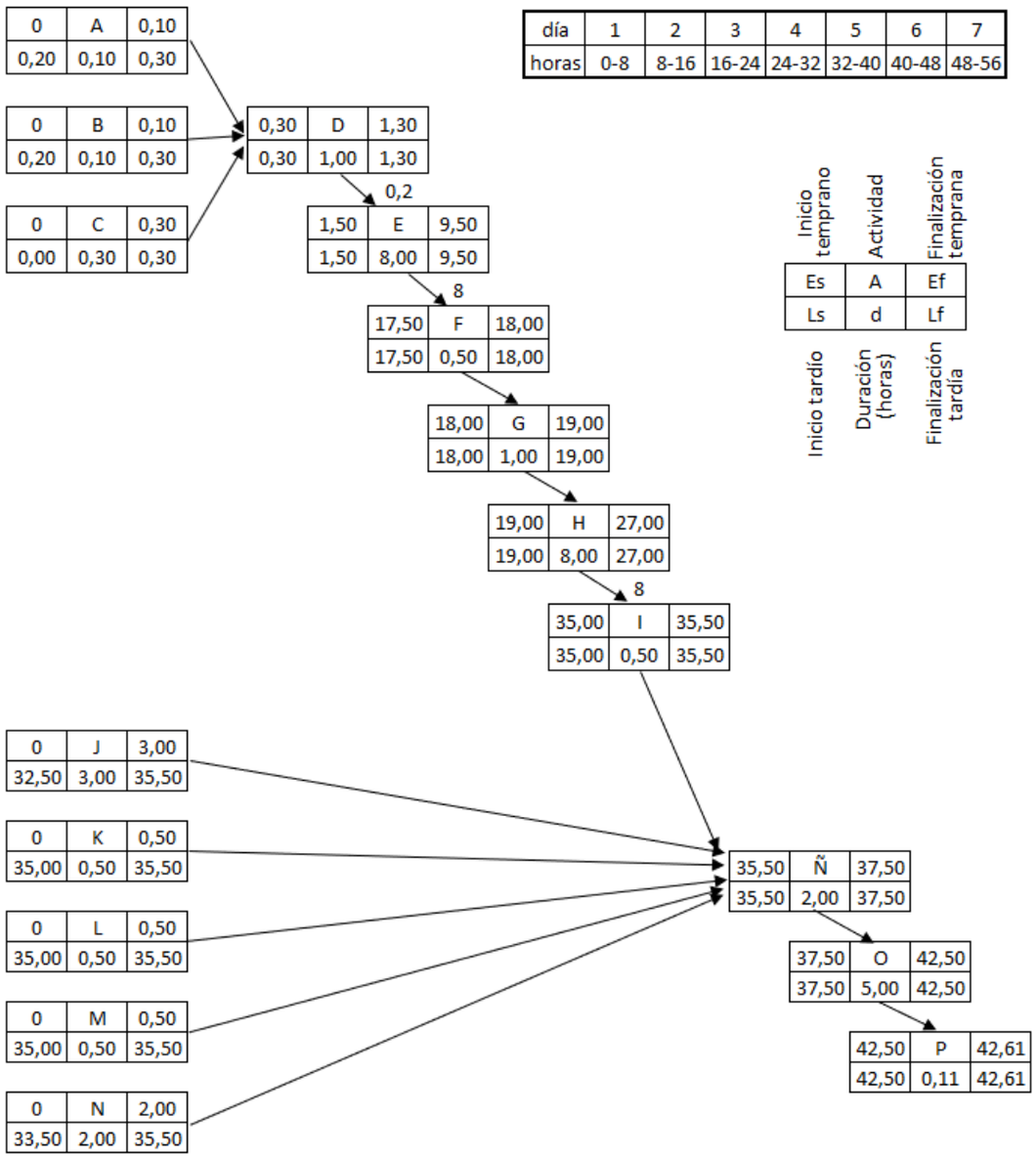
Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Diagrama PERT

Tabla 3-7. Tabla de tareas para diagrama PERT

Letra	Tarea	Duración (horas)	Precedente	Retraso
A	Corte de barras	0,10	-	0
B	Desbaste estructura	0,10	-	0
C	Desbaste nervios	0,30	-	0
D	Soldadura	1,00	A,B,C	0,2
E	Rectificado	8,00	D	8
F	Perforado	0,50	E	0
G	Roscado	1,00	F	0
H	Tratamiento superficial	8,00	G	8
I	Montaje componentes electrónicos	0,50	H	0
J	Limpieza y armado de transmisiones	3,00	-	0
K	Ensamble carro transversal	0,50	-	0
L	Ensamble brazo Z	0,50	-	0
M	Ensamble cabezal	0,50	-	0
N	Ensamble unidad de control	2,00	-	0
Ñ	Ensamble de todos los componentes	2,00	I,J,K,L,M,N	0
O	Calibración	5,00	Ñ	0
P	Empaque y almacenamiento	0,11	O	0

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-49. Diagrama PERT

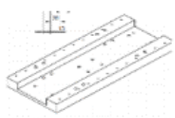
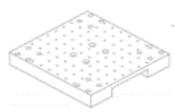
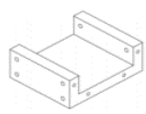
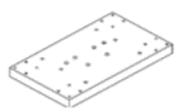
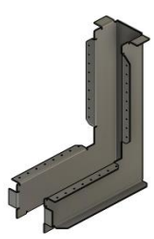
El diagrama PERT permite determinar las tareas que son críticas debido a que pueden generar retrasos en todo el proyecto si se retrasan. En este caso, se puede observar una clara ruta crítica formada por las tareas D, E, F, G, H, I, Ñ, O, P. Esto quiere decir que debe evitarse el retraso especialmente en esas tareas y se puede admitir el retraso en las tareas restantes.

Este análisis resulta de especial interés cuando se pretende optimizar el proyecto. En el caso específico de este proyecto puede no tener una relevancia evidente, pero podría emplearse para definir estrategias futuras.

3.6. COSTOS DE MANUFACTURA

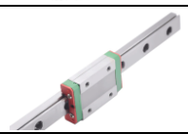
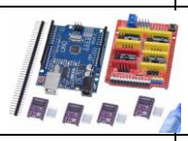
3.6.1. Insumos

Tabla 3-8. Lista de partes fabricadas al por menor y al por mayor

Partes fabricadas								
N°	**Item**	**Cantidad por lote**	**Imagen**	**Mat.**	**Proceso**	**Empresa**	**Precio unitario (USD) (sin iva)**	
							Lote de 1	**Lote de 200**
1	Carro transversal	1		6061	CNC	Smartmoldtech	$70	$38
2	Mesa	1		6061	CNC	Smartmoldtech	$93	$22
3	Brazo	1		6061	CNC	Smartmoldtech	$43	$19
4	Plataforma brazo Z	1		6061	CNC	Smartmoldtech	$58	$17
5	Soporte Z	2		6061	CNC	Smartmoldtech	$46	$9
7	Plataforma ZY	1		A36	Corte láser	Lemaco	$11	$11
8	Plataforma XY	1		A36	Corte láser	Lemaco	$11	$11
9	Columna parte A	1		A36	Corte y Plegado	Lemaco	$30	$30
10	Columna parte B	1		A36	Corte y Plegado	Lemaco	$30	$30
11	Soportes rieles MGN	4		1045	Corte	Otero Viña	$100	$50
12	Nervios	1		A36	Corte láser	Lemaco	$30	$30
13	Separador 5mm	2		PLA	Impreso en 3D		$1	$1
14	Envío internacional					DHL	$190	$7.500
						Precio total (USD)	**$712**	**$60.900**
						Precio total (CLP)	**$595.944**	**$50.973.300**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-9. Lista de partes estandarizadas al por menor y al por mayor

Partes estandarizadas						
N°	**Item**	**Cantidad por lote**	**Imagen**	**Detalles**	**Precio unitario (USD) (sin iva)**	
					Lote de 1	**Lote de 200**
1	Rodamientos lineales	6		MGN12H	$48	$26
2	Rieles	6		MGN12H. Largo = 300mm	$86	$30
3	Transmisión tornillos sinfín	3		Kit SFU1204 300mm + BKs + Soporte	$123	$48
4	Correas	6		GT2 220 9mm	$6	$6
5	Poleas dentadas	3		GT2 40T W10 8B	$12	$12
6	Arduino UNO + CNC shield	1		Versión china	$10	$10
7	Cable para electrónica	1		5m Cable 4 pines 22AWG	$6	$2
8	Enchufe	1		AC-4	$3	$1
9	Cable 220v	1		2m cable 220v 5A	$5	$1
10	Drivers motores	3		Driver stepper TB6600	$18	$18
11	Motores stepper	2		Nema 23 23HS5628 eje 8mm	$36	$36
12	Fuente de poder	1		360W 24v	$25	$25
13	6x Final de carrera	1		Mecánico	$3	$3

14	Spindle (Motor husillo)	1		Kit Spindle 500W + PS + collets	$85	$86
15	Extrusor	1		Chimera air-cooled	$20	$20
16	Quick-release clamp	2		Fabricado a pedido	$5	$5
17	Tornillos	114		M3x8	$3	$3
18	Tornillos	30		M3x16	$3	$3
21	Tornillos	8		M4x16	$1	$1
20	Tornillos	14		M5x16	$2	$2
19	Tornillos	18		M6x35	$2	$2
22	Tornillos	6		M6x65	$1	$1
23	Envío internacional				$139	$19.118
				Precio total (USD)	**$642**	**$87.186**
				Precio total (CLP)	**$537.362**	**$72.974.347**

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Costos fijos

Tabla 3-10. Costos fijos.

Markenting	$2.000.000
Taller oficina Chile	$1.500.000
Salario Ingeniero jefe	$2.200.000
Salario Ingeniero informático	$2.200.000
Salario Técnico de ensamblaje	$2.200.000
Agente de ventas	$2.200.000
Transporte	$400.000
total	$12.700.000

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3. Maquinaria

Tabla 3-11. Costos de máquinas

N°	Máquina	Costo
1	Tronzadora	$200.000
2	Soldadora MIG	$600.000
3	Compresor	$200.000
	Total (CLP)	**$1.000.000**

Fuente: Elaboración propia.

3.6.4. Herramientas

Tabla 3-12. Costos de herramientas

N°	Herramienta	Costo
1	Taladro eléctrico	$200.000
2	Set machos y terrajas	$50.000
3	Crimpadora	$15.000
4	Alicate pelacables	$3.000
5	Pie de metro	$40.000
	Total (CLP)	**$308.000**

Fuente: Elaboración propia.

3.6.5. Costos variables

Tabla 3-13. Costos de manufactura

Manufactura

N°	Item	Proceso	Tiempo por cada producto (horas)	Costo (CLP)
Fabricación de estructura				
1	Corte de barras	Tronzado	0,1	$300
2	Desbaste estructura	Esmeril angular	0,1	$200
3	Desbaste nervios	Esmeril de pedestal	0,3	$100
4	Soldadura	MIG	1	$1.000
5	Rectificado	CNC	externo	$50.000
6	Perforado	Manual	0,5	$200
7	Roscado	Manual	1	$200
8	Tratamiento superficial	Pintura electrostática	externo	$70.000
Ensamble de componentes				
9	Ensamble componentes electrónicos	Manual	0,5	$0
10	Limpieza y armado de transmisiones	Manual	3	$2.000
11	Ensamble carro transversal	Manual	0,5	$0
12	Ensamble brazo Z	Manual	0,5	$0
13	Ensamble cabezal	Manual	0,5	$0
14	Ensamble unidad de control	Manual	2	$500
15	Ensamble de todos los componentes	Manual	2	$500
16	Calibración	Manual	5	$1.000
		Total (CLP)		**$126.000**

Fuente: Elaboración propia.

3.6.6. Precio de venta

Tabla 3-14. Precio por unidad, al por mayor y de venta

Item	1 unidad	200 unidades
Partes fabricadas	$595.944	$50.973.300
Partes estandarizadas	$537.362	$72.974.347
Costo de manufactura	$126.000	$25.200.000
total	**$1.259.306**	**$149.147.647**

Costo unitario al por menor:	$1.259.306
Costo unitario al por mayor:	$745.738
Costo de venta en Chile:	$3.000.000
Costo de venta en el extranjero:	$2.700.000

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3-14 muestra el precio de venta por unidad cuando se produce en un lote de 200 unidades y de 1. El precio de venta unitario para Chile se definió como el precio medio de la competencia más cercana (Boxzy y 6040CNC), menos el IVA)
El precio de venta para los demás países se le descontó $300.000 pesos por conceptos de pagos al representante o vendedor en el país.

4. CAPÍTULO 4: ANÁLISIS FINANCIERO

En este capítulo se analiza el proyecto como un negocio, para estudiar la viabilidad económica del mismo. Para esto, primero se ha realizado una estimación de la posible demanda, para luego proponer una estimación de la factibilidad económica mediante un flujo de caja del proyecto.

4.1. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA

En Chile hay al menos 46 FabLabs anexados a Universidades con presencia de maquinaria dedicada al prototipado:

- Protein Lab UTEM
- FabLab UACh
- FabLab UC (impresoras, centro cnc, láser, plotter)
- FabHaus (impresoras, centro cnc, laser, etc)
- FabLab UV
- FabLab Concepción (router, laser, impresoras 3d)
- Aconcagua FabLab (impresoras, fresadora cnc, laser, ploter)
- FabLab Atacama-AIS (empresa privada asociada a colegio AIS)
- FabLab Santiago UAI (impresoras 3D, centro CNC, router, láser, etc)
- FabLab U. de Chile (impresoras 3D, centro CNC, router, laser, etc)
- FabLab Santiago (impresoras 3D, centro CNC, laser, circuitos, etc)
- FabLab UTFSM
- FabLab INACAP (1 laboratorio en cada una de las 26 sedes en el país)
- FabLab FI UDEC
- Campus creativo Universidad Andrés Bello
- FabLab Universidad de los Andes
- FabLab Austral
- FabLab U. de Talca
- FabLab U. del Bío Bío
- FabLab U. Mayor
- FabLab U. San Sebastián

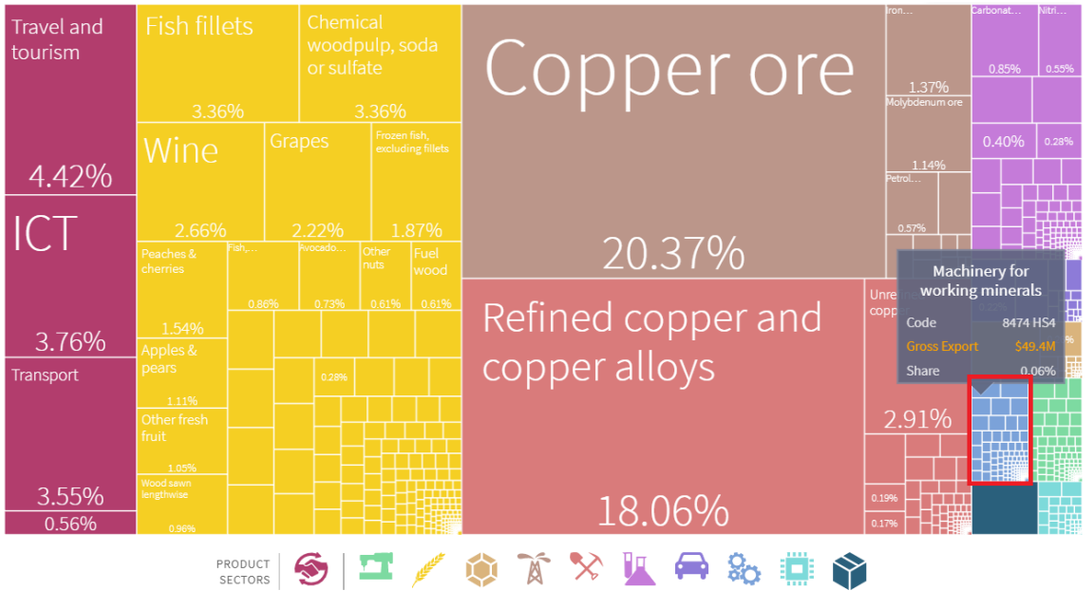
Las instituciones de educación superior más propensas a requerir este tipo de maquinaria lo comprenden Universidades y Centros de Formación Técnica. En conjunto totalizan cerca de 100 instituciones de educación superior a nivel nacional (sin contar que algunas cuentan con varias sedes, como INACAP). Si incluimos colegios de educación técnico-profesional como parte del segmento objetivo podemos sumar a cerca de 1000 establecimientos adicionales.

Como se ha mencionado al inicio de este trabajo, el prototipado, y por consiguiente, este negocio, se relaciona con mayor intensidad con actividades económicas de la industria manufacturera.
Se sabe que Chile es un país con escasas actividades en esta industria. Por esto motivo, se deben abarcar también otros mercados relevantes de América Latina. Se escogieron a tres países que presentan las canastas exportadoras más intensivas en manufactura. Estos son: México, Argentina y Brasil.

En los siguientes diagramas se puede observar un resumen de las actividades económicas de los distintos países, elaborado con datos de las exportaciones de cada nación. Se han resaltado las actividades que presentan mayor afinidad con el mercado objetivo.

Simbología:

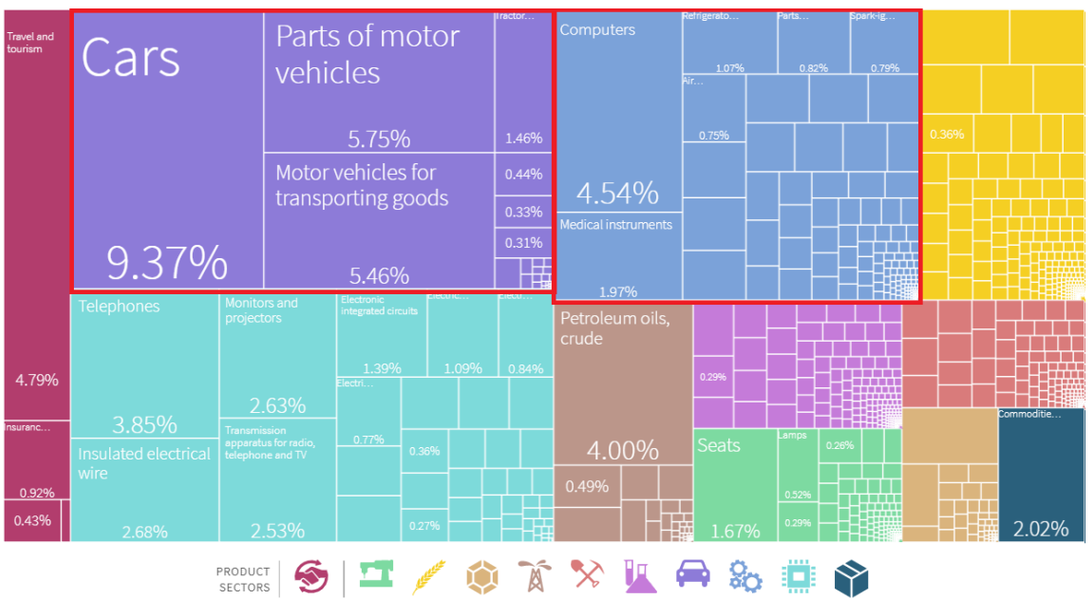
Chile:



Fuente: atlas.cid.harvard.edu/countries/42/export-basket

Figura 4-1. Actividades económicas de Chile

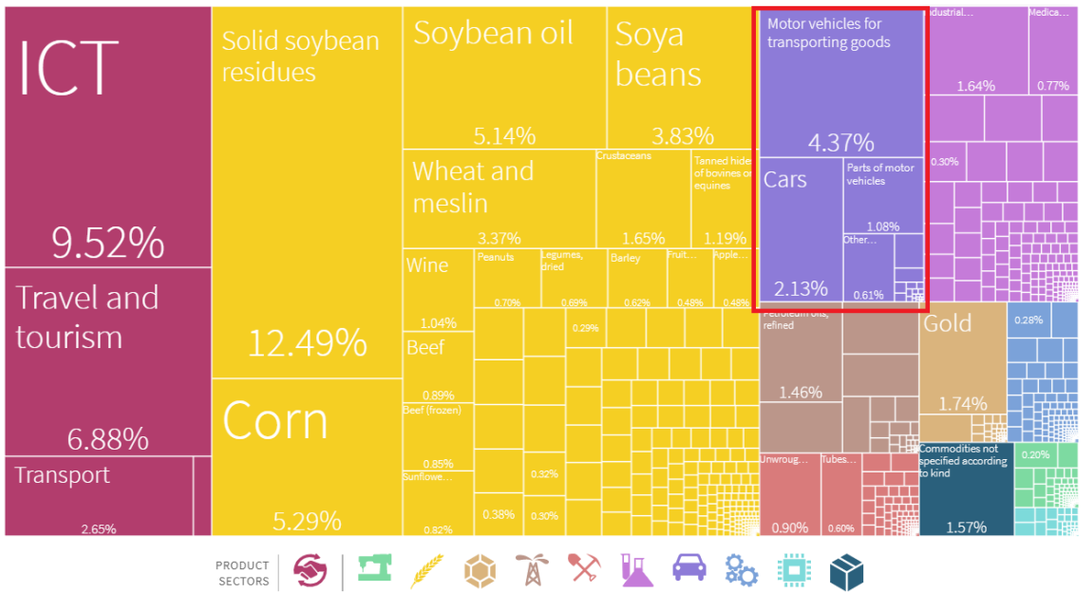
México:



Fuente: atlas.cid.harvard.edu/countries/138/export-basket

Figura 4-2. Actividades económicas de México

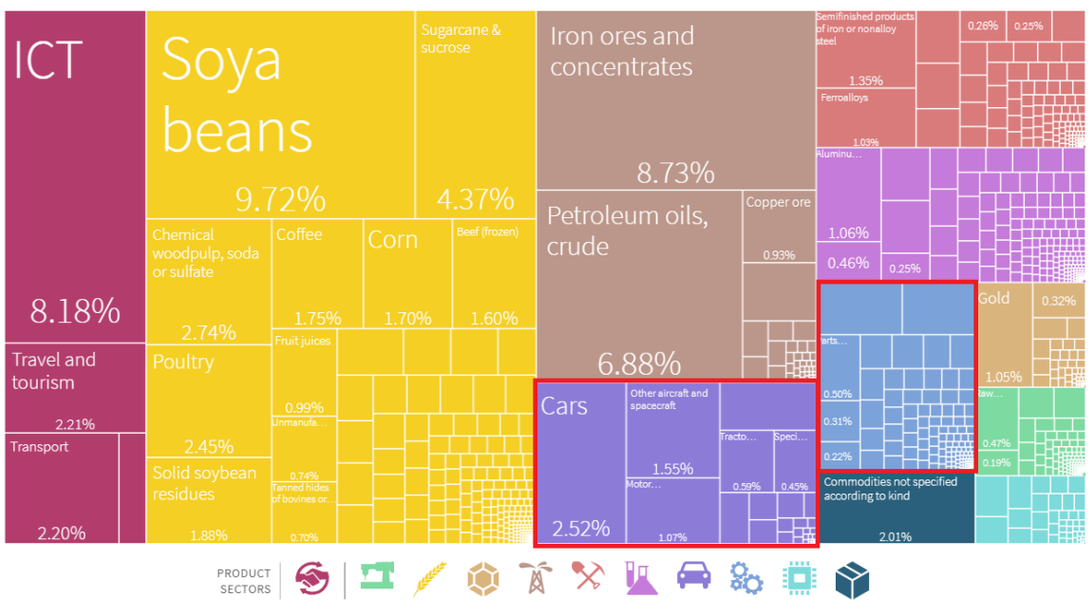
Argentina:



Fuente: atlas.cid.harvard.edu/countries/8/export-basket

Figura 4-3. Actividades económicas de Argentina

Brasil:



Fuente: atlas.cid.harvard.edu/countries/32/export-basket

Figura 4-4. Actividades económicas de Brasil

A partir de este catastro se estableció un mercado meta de 30% de los FabLabs y 10% del total de establecimientos educacionales técnico-profesionales en Chile y sólo se consideraron los FabLab en el extranjero (poner por qué). Se asumió y de forma conservadora, la compra de una sola máquina CNC de escritorio cada cinco años, por lo que se venderían 114 equipos en 5 años, es decir, 23 equipos anuales aproximadamente sólo en Chile.

Para el caso del mercado internacional, se asumió que:

1) El mercado objetivo será del 5%
2) La cantidad de FabLabs es proporcional a la cantidad de habitantes del país.

Para precisar un poco más el análisis, se ajustó el mercado objetivo por poder de paridad de compra (PPP) de cada país para hacer comparable la capacidad de compra de los clientes en cada uno de ellos, estableciendo a Chile como factor de referencia 1, y para los mercados extranjeros se aplica un factor de corrección *fc*,

$$fc = \frac{PIB\ PPP\ X}{PIB\ PPP\ Chileno} \tag{47}$$

Donde X es el mercado extranjero objetivo.

Por lo tanto, si el mercado objetivo de Chile es el 30%, y el factor de corrección es 1, el mercado objetivo se mantiene. Para Brasil, por otro lado, el fc sería PIB PPP brasileño (15000 USD) dividido en el chileno (24700 USD), que es igual a 0,6. Como el mercado objetivo de un país extranjero se ha definido como 5%, se aplica el factor fc y queda el mercado objetivo final: 5% x 0,6 = 3%.

La siguiente tabla resume los datos que definen el mercado anual:

País	Población (Millones de habitantes)	PIB per cápita PPP 2018 (USD)	Factor de correción (fc)	FabLabs totales estimados	Mercado anual con fc
Chile	19	24700	1,0	46	23
México	126,2	20400	0,8	306	25
Argentina	44,5	23300	0,9	108	10
Brasil	209,5	15000	0,6	507	31
				Total:	**89**

Fuente: Elaboración con datos del Banco Mundial.

Figura 4-5. Mercado total estimado.

De las 89 máquina vendidas anuales, 23 son en chile y 66 en el extranjero.

4.2. VIABILIDAD DEL PROYECTO COMO NEGOCIO

Para analizar la viabilidad del proyecto, se ha propuesto un flujo de caja que incorpora los ingresos por ventas de las máquinas de acuerdo al mercado objetivo establecido previamente. Todo esto pensado en un contexto de financiamiento externo mediante crédito. Se asumió la utilización de un crédito Corfo para micro, pequeñas y medianas empresas (Mipyme), ya que es el único instrumento que existe actualmente en chile para una startup de esta magnitud y sin historial de ventas.

Por otro lado, cabe destacar que, como se indica en la introducción de este trabajo, el análisis financiero sólo se expone como una manera de ofrecer un acercamiento preliminar a lo que puede significar el desarrollo de este trabajo como un negocio. De igual manera, se puso atención en mantener la imparcialidad y objetividad en el desarrollo de éste, entendiendo que un análisis más detallado de este tipo requiere criterios y conceptos que se escapan del alcance de este trabajo.

El flujo de caja de la tabla 4-1 se ha desarrollado de acuerdo a lo siguiente:

1) **Los costos variables involucran la manufactura de los 89 productos anuales.**

   Se da por supuesto que cada año se realiza la venta a la totalidad del mercado objetivo, que es de 89 unidades. Esto supone el mismo valor cada año de los costos de manufactura, los cuales se traducen en costos variables, ya que podrían variar, eventualmente, según varía el mercado objetivo.

2) **El préstamo del año 0 representa la compra de todos los insumos para la fabricación de 200 unidades.**

   Estos insumos deben ser vueltos a comprar en el año 2, utilizando la inversión acumulada de las ganancias como capital de trabajo de los 2 años anteriores.

3) **Se utilizó una tasa de descuento de 10%**

   La tasa de descuento utilizada para calcular el VAN se definió como 10%, ya que se considera como un proyecto altamente riesgoso y corresponde a la rentabilidad aproximada en renta variable (Por ejemplo, fondos mutuos de alto riesgo)

4) **Se utilizó una tasa de interés del 4,09% anual**

   Corresponde a una tasa de interés de un financiamiento Corfo Mipyme.

5) **Se consideró un impuesto del 25%**

   Corresponde al impuesto a la renta anual, según el SII en 2018.

Tabla 4-1. Flujo de caja del proyecto con subsidio Corfo Mipyme

		Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
+	Ingresos por ventas		$247.200.000	$247.200.000	$247.200.000	$247.200.000	$247.200.000
+	Otros ingresos						
-	Costos fijos		$11.900.000	$11.900.000	$11.900.000	$11.900.000	$11.900.000
-	Costos variables		$11.214.000	$11.214.000	$11.214.000	$11.214.000	$11.214.000
-	Compra de insumos	$123.947.647		$154.934.559			
-	Interese crédito 1		$5.436.939	$4.322.556	$3.162.772	$1.955.736	$699.523
-	Depreciaciones		$200.000	$200.000	$200.000	$200.000	$200.000
=	**Utilidad antes de impuestos**		**$218.449.061**	**$64.628.885**	**$220.723.228**	**$221.930.264**	**$223.186.477**
-	Impuesto		$54.612.265	$16.157.221	$55.180.807	$55.482.566	$55.796.619
=	**Utilidad después de impuestos**		**$163.836.796**	**$80.786.106**	**$165.542.421**	**$166.447.698**	**$167.389.858**
+	Depreciaciones		$200.000	$200.000	$200.000	$200.000	$200.000
=	**Flujo de caja operacional**		**$164.036.796**	**$80.986.106**	**$165.742.421**	**$166.647.698**	**$167.589.858**
-	Inversión fija						
-	Capital de trabajo	$23.114.000	$70.500.000	$70.500.000			
+	Préstamos	$148.369.647					
-	Amortizaciones credito 1		$27.352.495	$28.466.878	$29.626.663	$30.833.699	$32.089.911
=	**Flujo de capitales**		**-$97.852.495**	**-$98.966.878**	**-$29.626.663**	**-$30.833.699**	**-$32.089.911**
=	**Utilidades finales empresa**		**$66.184.301**	**-$17.980.772**	**$136.115.758**	**$135.813.999**	**$135.499.947**

VAN (r=0,10) =	$176.101.136
TIR	39,9%

Fuente: Elaboración propia.

El flujo de caja muestra un VAN mayor a cero, por lo cual se puede considerar como un proyecto económicamente viable.

4.2.1. Análisis de sensibilidad

Se puede analizar el impacto que tiene la magnitud de los ingresos en el VAN y el TIR para comprender de mejor manera cómo se comporta el flujo de caja del negocio de acuerdo a la variación de las ventas.

La tabla 4-2 muestra el VAN y el TIR que tendría el negocio (según tabla 4-1) de acuerdo a distintas magnitudes de ingresos, comenzando en 150 millones y aumentando de a 12,5.

Tabla 4-2. Ingresos vs VAN-TIR

Ingresos	VAN	TIR (%)
$150.000.000	-$140.412.509	-13,8
$162.500.000	-$99.708.594	-6,8
$175.000.000	-$59.004.679	0,05
$187.500.000	-$18.300.764	6,9
$200.000.000	$22.403.152	13,8
$212.000.000	$61.478.910	20,4
$225.000.000	$103.810.982	27,6
$237.000.000	$142.886.741	34,3
$250.000.000	$185.218.813	41,5

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que los ingresos actuales calculados en la tabla 4-1 podrían disminuir en 50 millones aproximadamente para que el negocio se pueda considerar como inviable económicamente. Por lo tanto, se puede concluir que el negocio soporta una variación de 50 millones en ingresos como máximo para mantener la viabilidad.

CONCLUSIONES

Se puede concluir, a grandes rasgos, que resulta factible diseñar y fabricar una fresadora CNC de escritorio que integre procesos de manufactura aditiva y sustractiva.

Sin embargo, contrariamente a lo supuesto en un inicio, el plegado de chapa metálica no parece ser un proceso adecuado para fabricar la estructura de este tipo de máquina. La resonancia a las frecuencias de trabajo existe y resulta difícil evitarla o disminuirla en la configuración descrita en este trabajo.

Además, la configuración de la estructura en una sola pieza genera dificultades en el proceso de mecanizado. Se estima que es más adecuado fabricar la estructura en dos partes que puedan ser mecanizadas cada una por sí sola, para finalmente ensamblarlas.

Por otro lado, se dio cuenta de que el diseño de la máquina está determinado casi en su totalidad por la función de mecanizado. Esto debido a que las tres funciones de la máquina (impresión 3D, grabado láser y mecanizado) comparten los mismos requerimientos de diseño pero en distintos niveles de complejidad, siendo la función de mecanizado la más compleja y demandante. Esto significa que la utilidad de la máquina será óptima en la medida que el usuario se centre mayoritariamente en la función de mecanizado.

Finalmente se descubrió que, en el caso específico de este trabajo, conviene iniciar el diseño a partir del elemento que soluciona el problema con mayor interconectividad dentro del esquema conceptual de diseño, y que se visualiza como más invariable en el desarrollo del proyecto según conocimientos tácitos y experiencia.

Se podría extrapolar esta última hipótesis al diseño de productos en general, empleándolo como una estrategia que debería ser formalizada al inicio de cada proyecto para conducir a un esquema de diseño más lógico y predecible, especialmente cuando no se cuenta con la experiencia en el diseño de productos similares.

Bibliografía

Adebayo, A. (2010). Mechanical Vibration Basics and Shaft Vibration. *Workshop on management and maintenace of vibration in hydroturbine plants and compressor*.

Admin, C. (13 de 04 de 2017). *Cadem*. Obtenido de https://www.cadem.com/post/cnc-axes-acceleration-cycle-time

B.S. El-Khasawneh, P. F. (1999). Computation of stiffness and stiffness bounds for parallel link manipulators. *International Journal of Machine Tool and Manufacture 39*, 321-342.

Bertalanffy, L. V. (1968). *Teoría general de los sistemas.* Ciudad de México: Fondo de cultura económica S.A.

Budynas, R. G. (2019). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley .* McGraw-Hill.

coromant, S. (10 de 05 de 2020). *Sandvik coromant knowledge*. Obtenido de https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx

Gieck, K. (2016). *Manual de fórmulas técnicas, Gieck.* Alfaomega.

H. Chanal, E. D. (2006). A study of the impact of machine tool structure on machining processes. *International Journal of Machine Tool & Manufacture 46*, 98-106.

HIWIN. (2020). *HIWIN Ballscrews, technical information.*

HIWIN. (2020). *HIWIN Linear guideways, technical information.*

Kelly, S. G. (2012). *Mechanical vibrations: Theory and applications.* Cengage Learning.

L. Jensen, A. Ö. (2016). Proceedings of the DESIGN 2016. *14th International Design Conference*.

Lemaco. (15 de 11 de 2019). *Lemaco*. Obtenido de http://lemaco.cl/_pdfs/recomendaciones_plegado.pdf

M. Terrier, A. D. (2004). Qualification of parallel kinematics machines in high speed milling on free form. *International Journal of Machine Tool and Manufacture 44*, 865-877.

Ramírez, C. (2010). Propuestas Metodológicas para el desarrollo de productos. *Pensamiento y gestión, N° 30*.

SCLATER, N. (2007). *MECHANISMS AND MECHANICAL DEVICES SOURCEBOOK.* McGraw-Hill.

Thompson, R. (2011). *Prototyping and Low-Volume Production (The Manufacturing Guides).* Thames & Hudson.

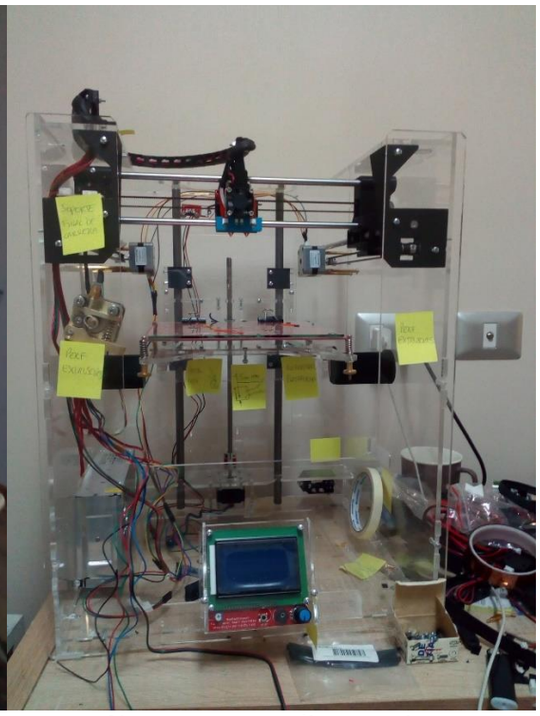
Tippens, P. E. (2016). *Física, conceptos y aplicaciones .* McGraw-Hill.

Ullman, D. (2010). *The mechanical design process.* Nueva York: McGraw-Hill.

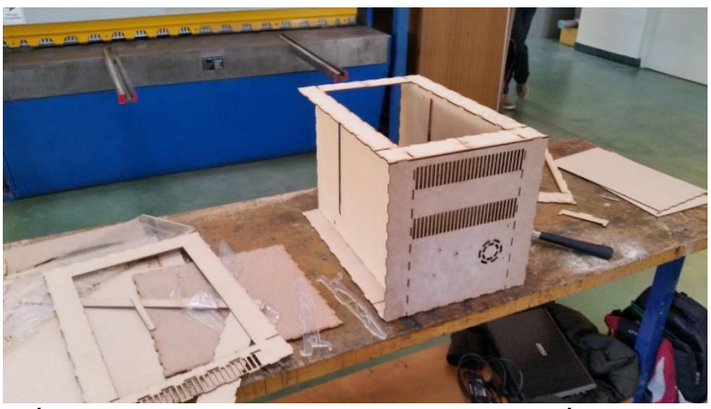
Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos.* Mc Graw Hill.

ANEXO A: Impresora Prisma Uno

Estructura en acrílico segundo prototipo



Notas para analizar mejoras



Construcción del primer prototipo. La estructura está fabricada en MDF.

Imprimiendo en el primer prototipo

ANEXO B: Cálculos de fuerzas

1) Fuerza de corte:

$$F = \frac{\emptyset t f K}{v} \tag{1}$$

Resistencia a la tensión σ_R en N/mm²	400	500	600	700	800	900	1000
a	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.2

Fuente: Manual de fórmulas técnicas de Gieck.

Figura A-1. Factor a para mecanizado en acero

Resolviendo K (Resistencia específica del acero):

$$K = \sigma_x \text{ a} \tag{2}$$

$$K = 1000 \frac{N}{mm^2} \tag{3}$$

Resolviendo velocidad de corte:

$$v\,[mm/min] = \pi \times \emptyset \times RPM \tag{4}$$

$$v = 9420 \frac{mm}{min} \tag{5}$$

Resolviendo fuerza de corte:

$$F = \frac{3mm \times 0{,}5mm \times 300 \frac{mm}{min} \times 1000 \frac{N}{mm^2}}{9420 \frac{mm}{min}} \tag{6}$$

$$F = 47{,}8N \tag{7}$$

2) Fuerza de aceleración

$$F = ma \tag{8}$$

$$F = 30kg * 3m/s2 \tag{9}$$

$$F = 90N \tag{10}$$

3) Fuerza de roce:

*F roce guías = F peso a desplazar * coef. Fricción rieles MGN* (11)

*F roce guías = 294N*0,004* (12)

F roce guías =1,176N (13)

ANEXO C: Desarrollo Diagrama de cuerpo libre

Plano frontal XZ Plataforma Z

Se tienen dos momentos actuando en este plano: My y su reacción MRy, producidos por la fuerza Fx=50N en el extremo del husillo.

$$\Sigma M = 0 \tag{17}$$

$$My = MRy \tag{18}$$

$$(50 * d1) = 4Rx1 * d2 \tag{19}$$

$$Rx1 = \frac{12{,}5 * d1}{d2} \tag{20}$$

Plano lateral YZ Plataforma Z

Se tienen cuatro momentos actuando en este plano: Mx1, con su reacción MRx1 y Mx2 con su reacción MRx2, producidos por la fuerza Fz=10N y Fy=50, respectivamente.

$$\Sigma M = 0 \tag{21}$$

$$Mx2 - Mx1 = MRx2 \tag{22}$$

$$50 * d1 - 10 * d4 = 4Ry3 * d2 \tag{23}$$

$$Ry3 = \frac{10 * d1 * d4}{(d4 - d1) * d2} \tag{24}$$

Plano superior XY Plataforma Z

Se tienen dos momentos actuando en este plano: Mz, con su reacción MRz, producidos por la fuerza Fx=50N.

$$\Sigma M = 0 \tag{25}$$

$$Mz = MRz \tag{26}$$

$$50 * d4 = 4Ry1 * d3 \tag{27}$$

$$Ry1 = \frac{12{,}5 * d4}{d3} \tag{28}$$

Plano frontal XZ Carro transversal

Al definir la disposición de los apoyos MGN como cuadrada, se genera una simetría de los planos XZ e YZ, por lo tanto, un solo plano es representativo para los dos casos.

Se tienen dos momentos actuando en este plano: My, con su reacción MRy, producidos por la fuerza Fx=50N.

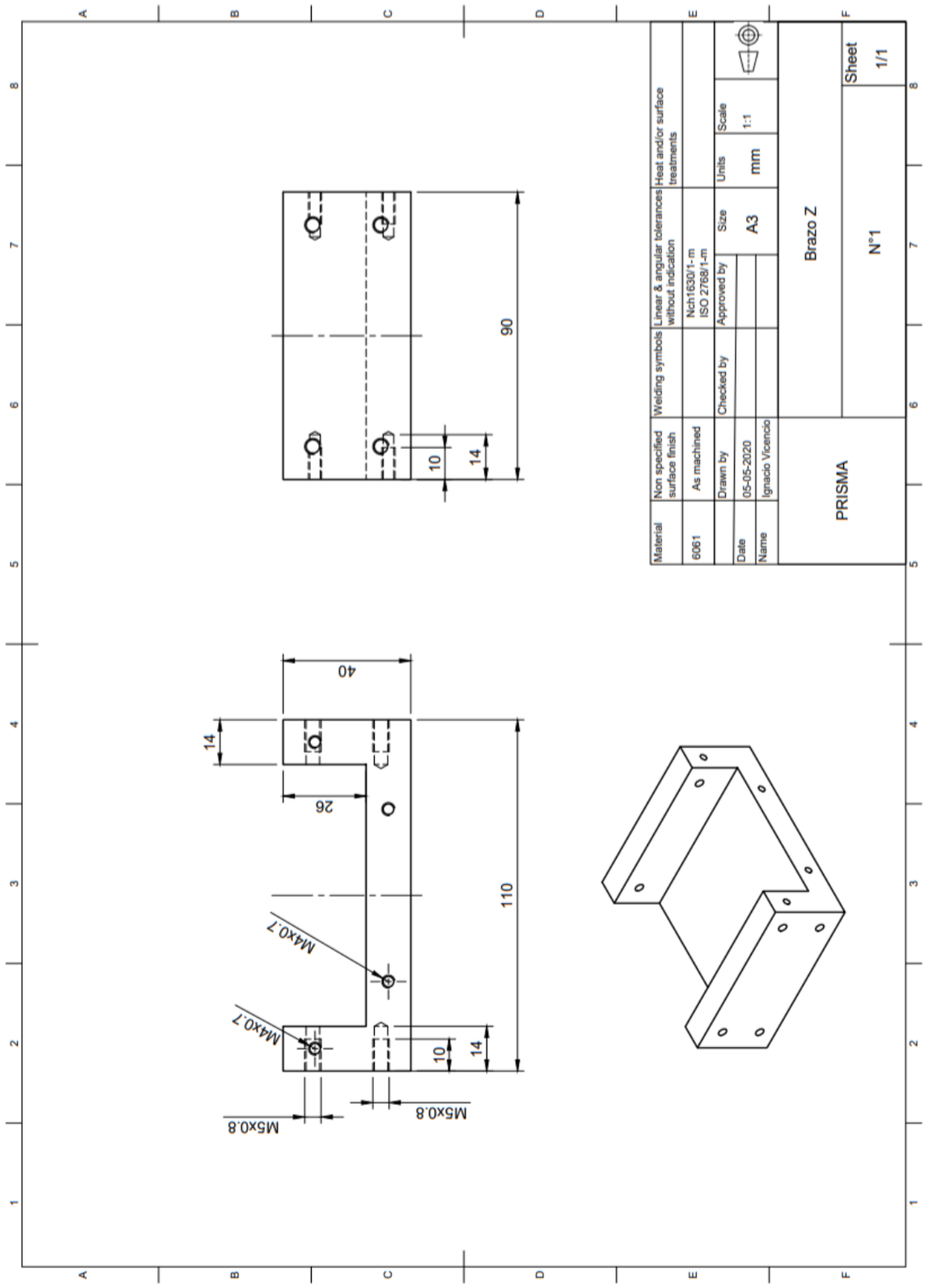
$$\Sigma M = 0 \tag{29}$$

$$My = MRy \tag{30}$$

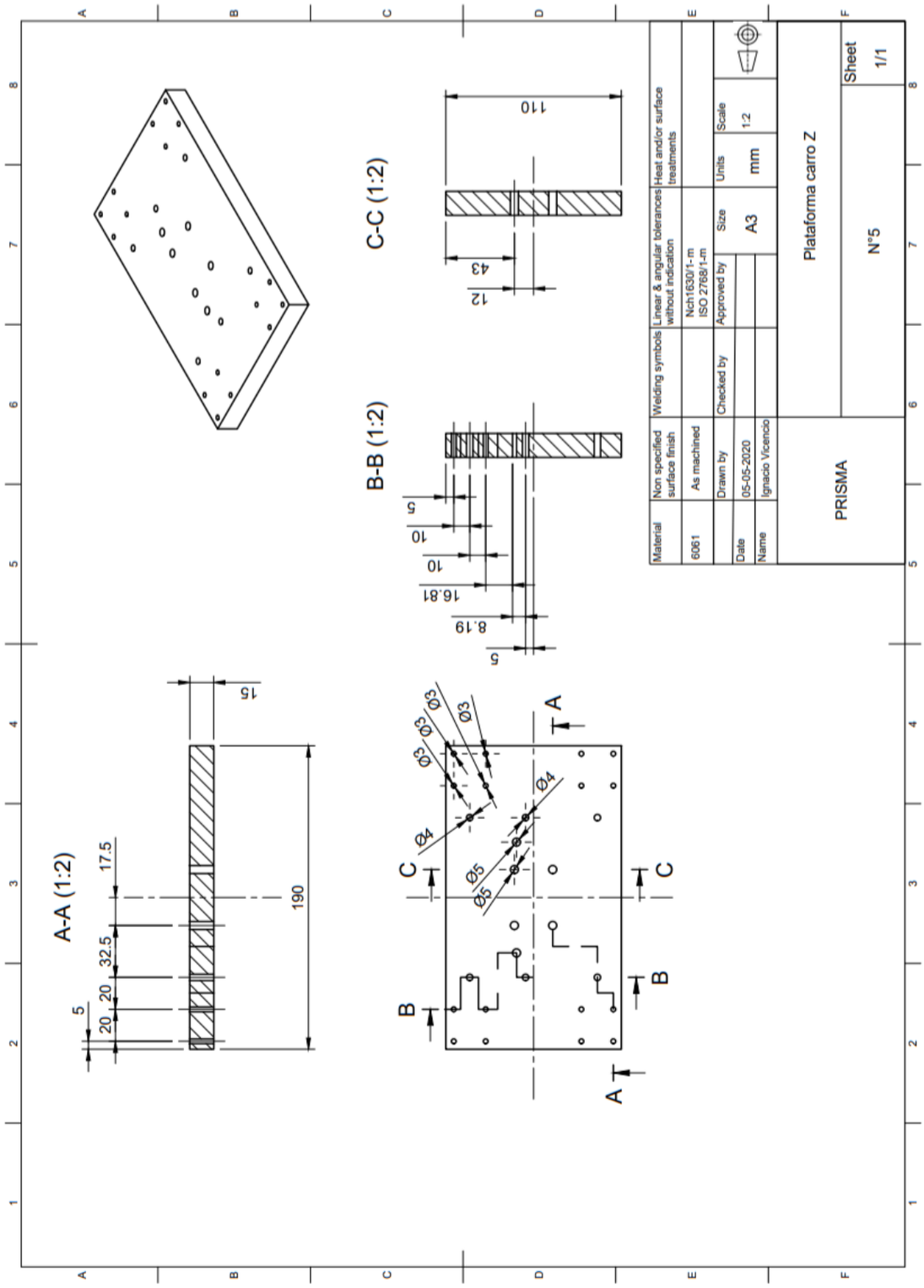
$$50 * d5 = 4Rz2 * d6 \tag{31}$$

$$Rz2 = \frac{12{,}5 * d5}{d6} \tag{32}$$

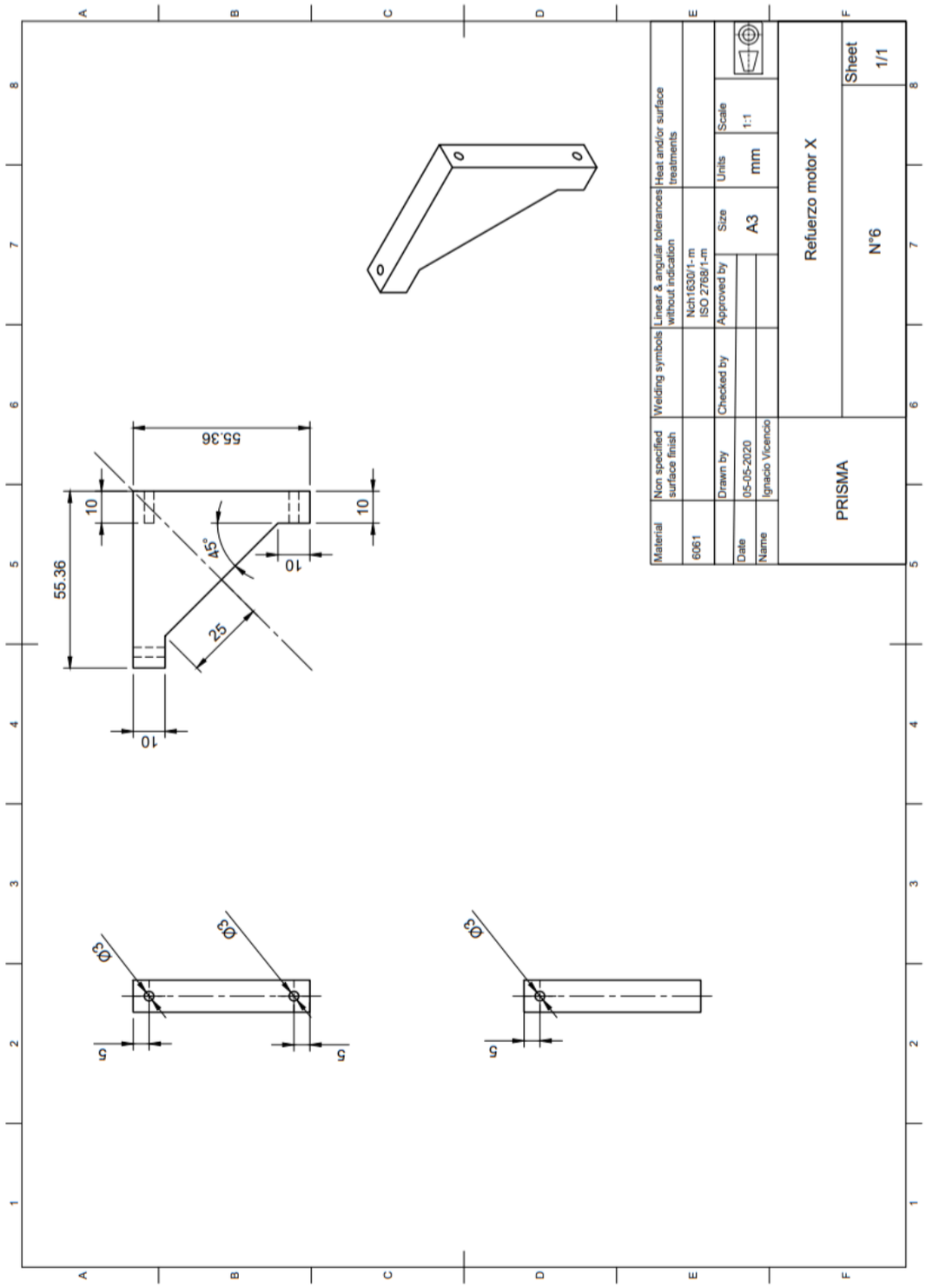
ANEXO D: Plano Brazo Z



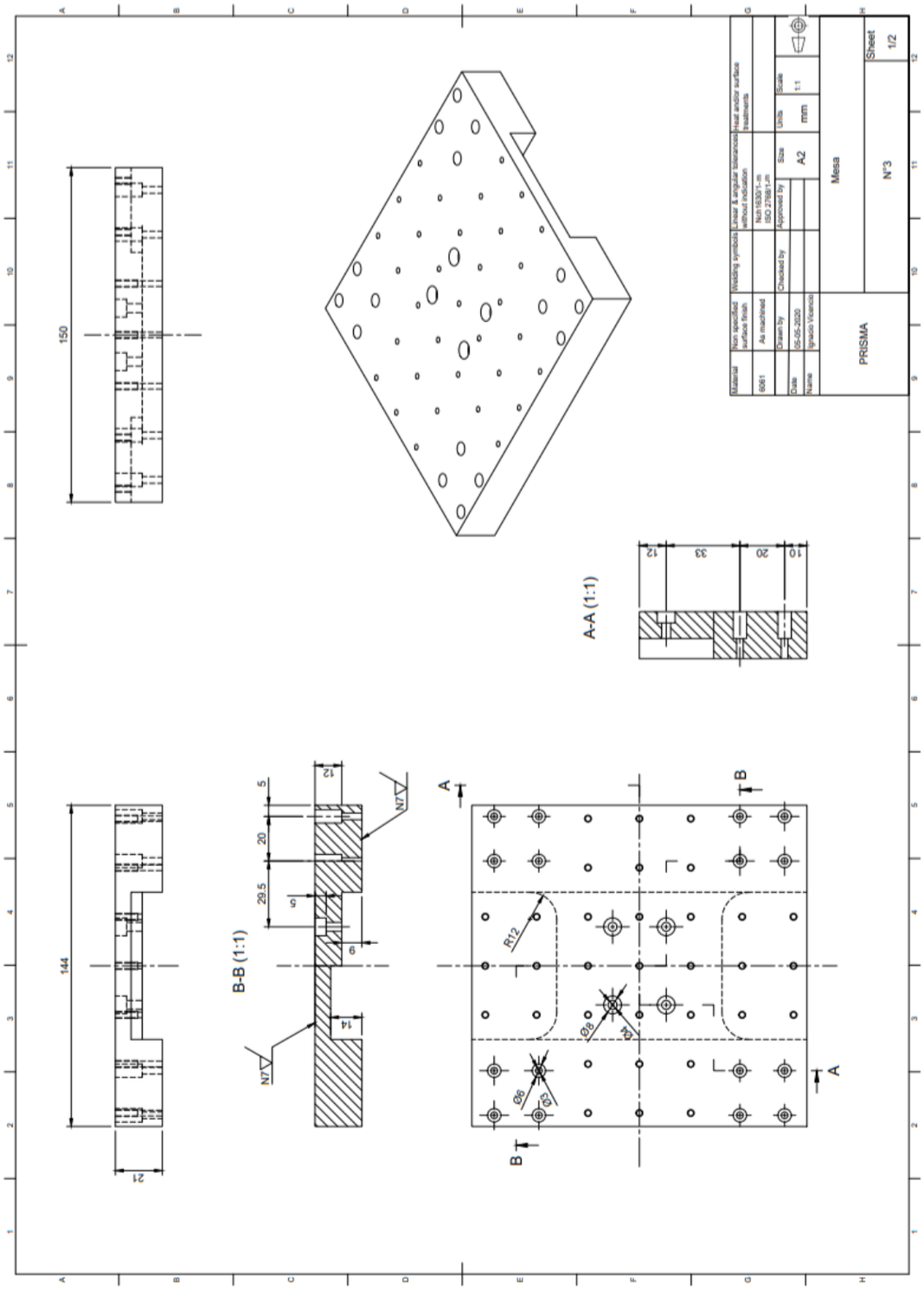
ANEXO E: Plano Plataforma Z



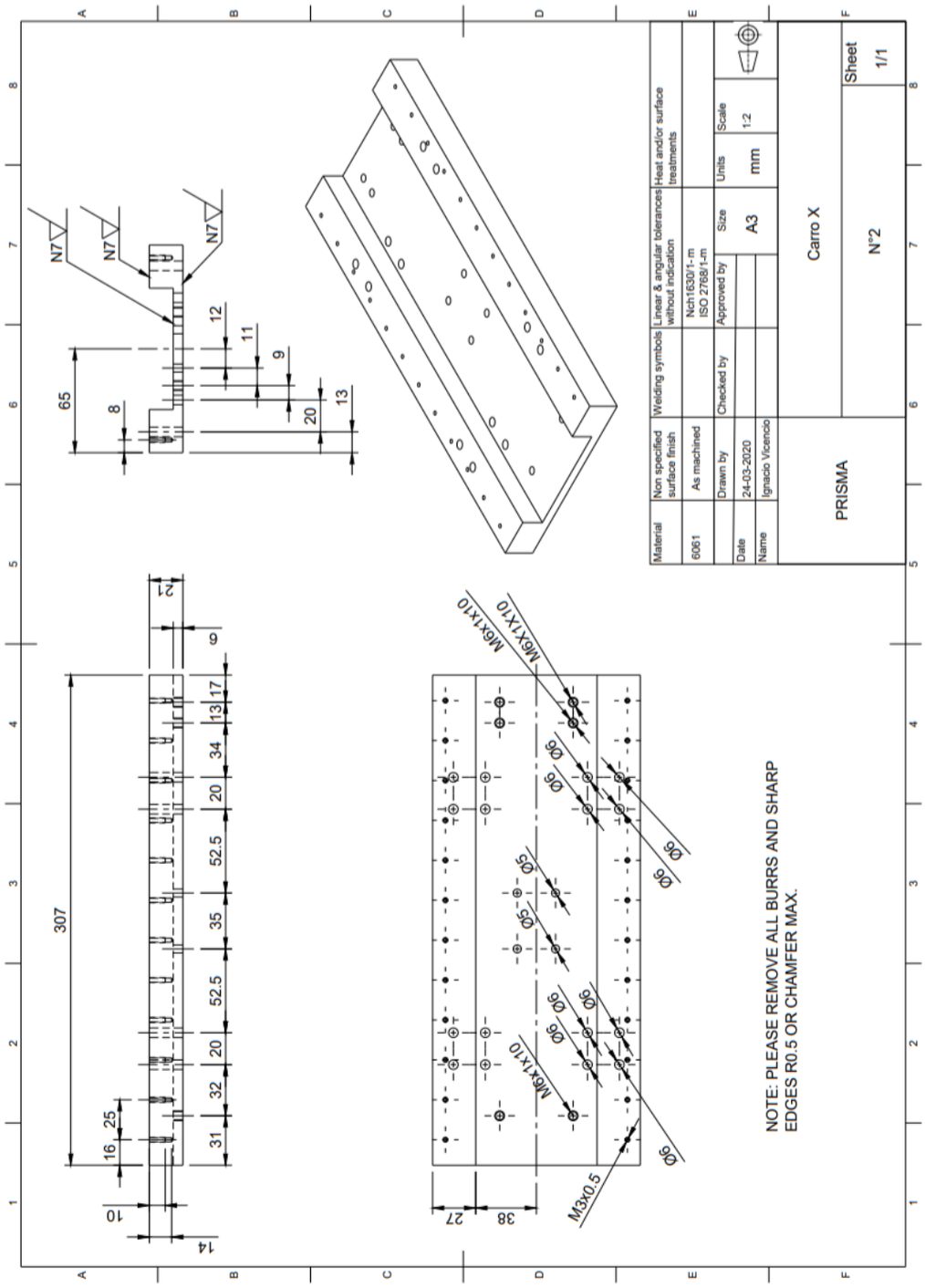
ANEXO F: Plano Refuerzo Z



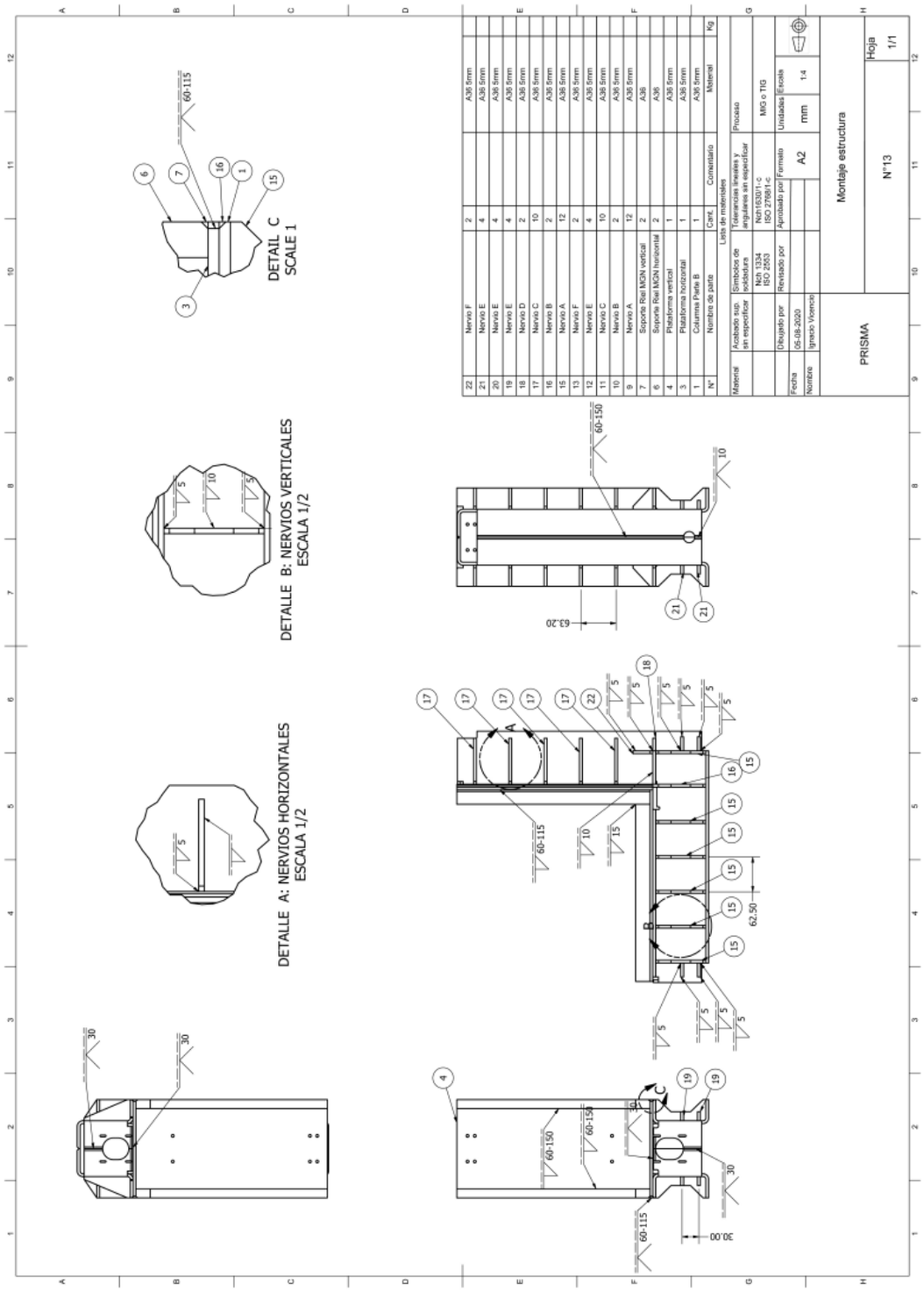
ANEXO G: Plano Mesa



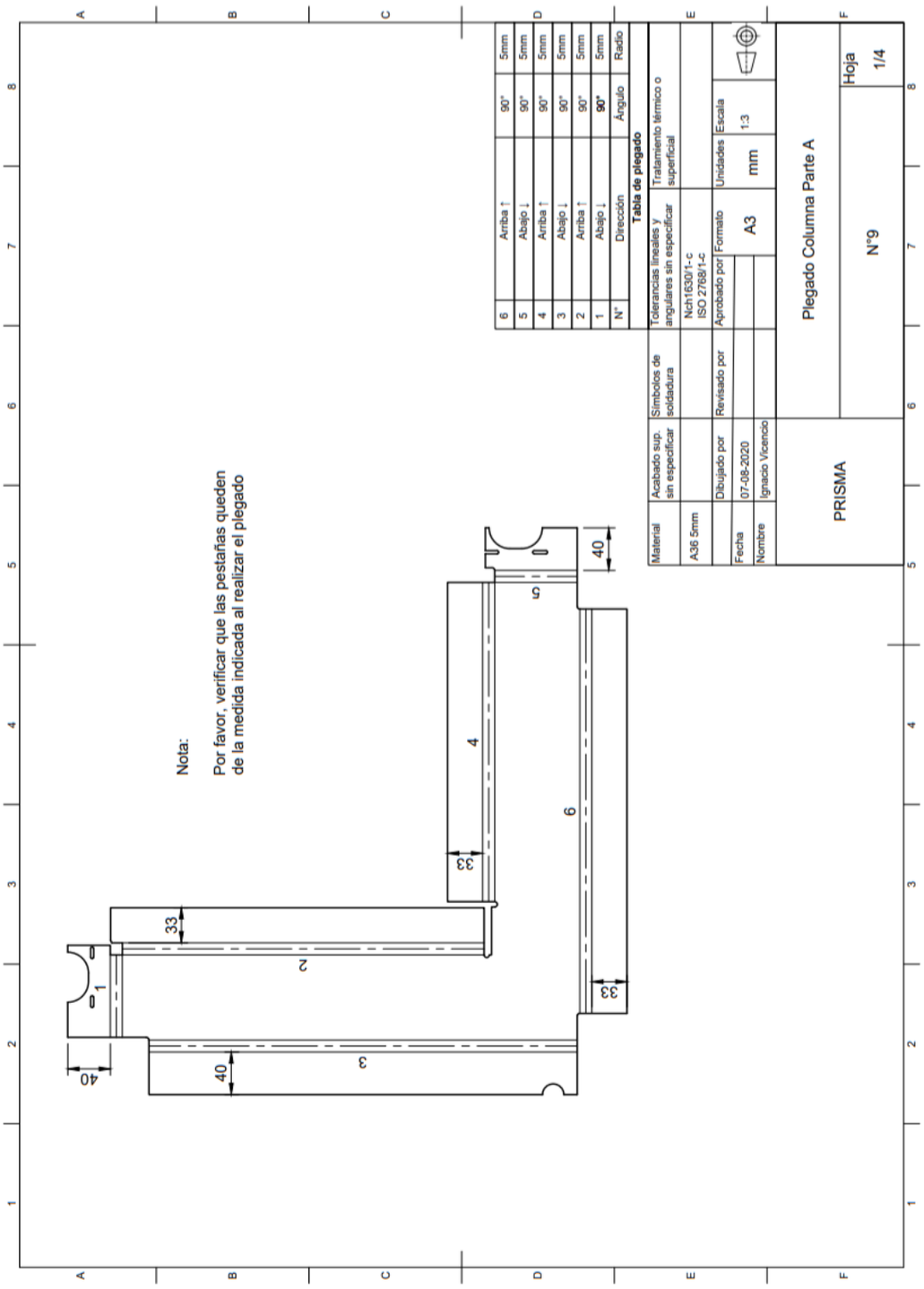
ANEXO H: Plano Carro Transversal



ANEXO I: Soldadura



ANEXO J: Plegado partes A y B



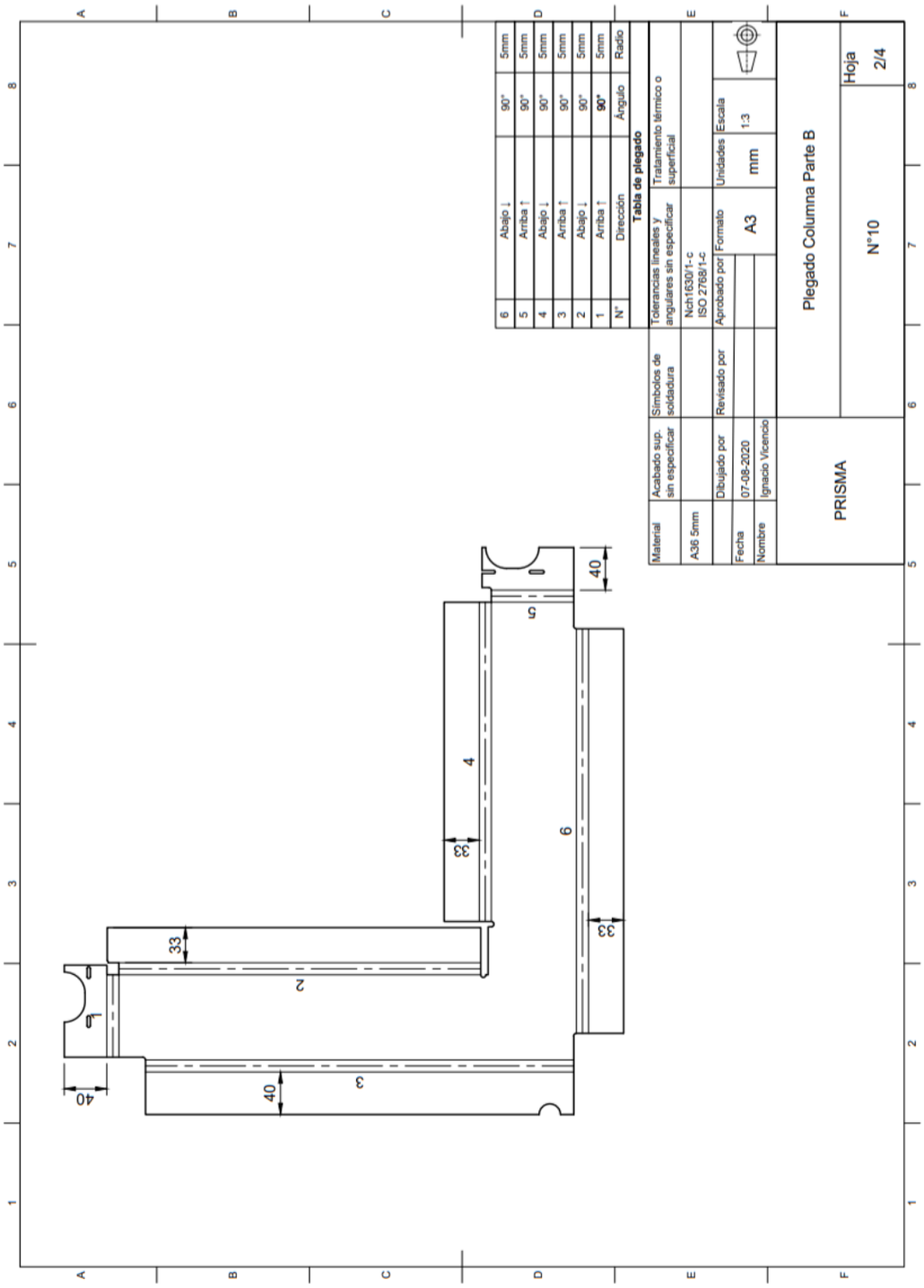
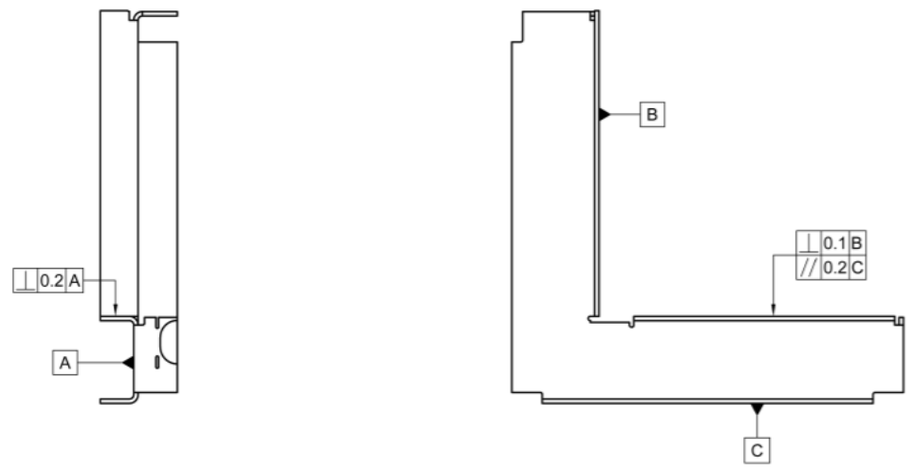
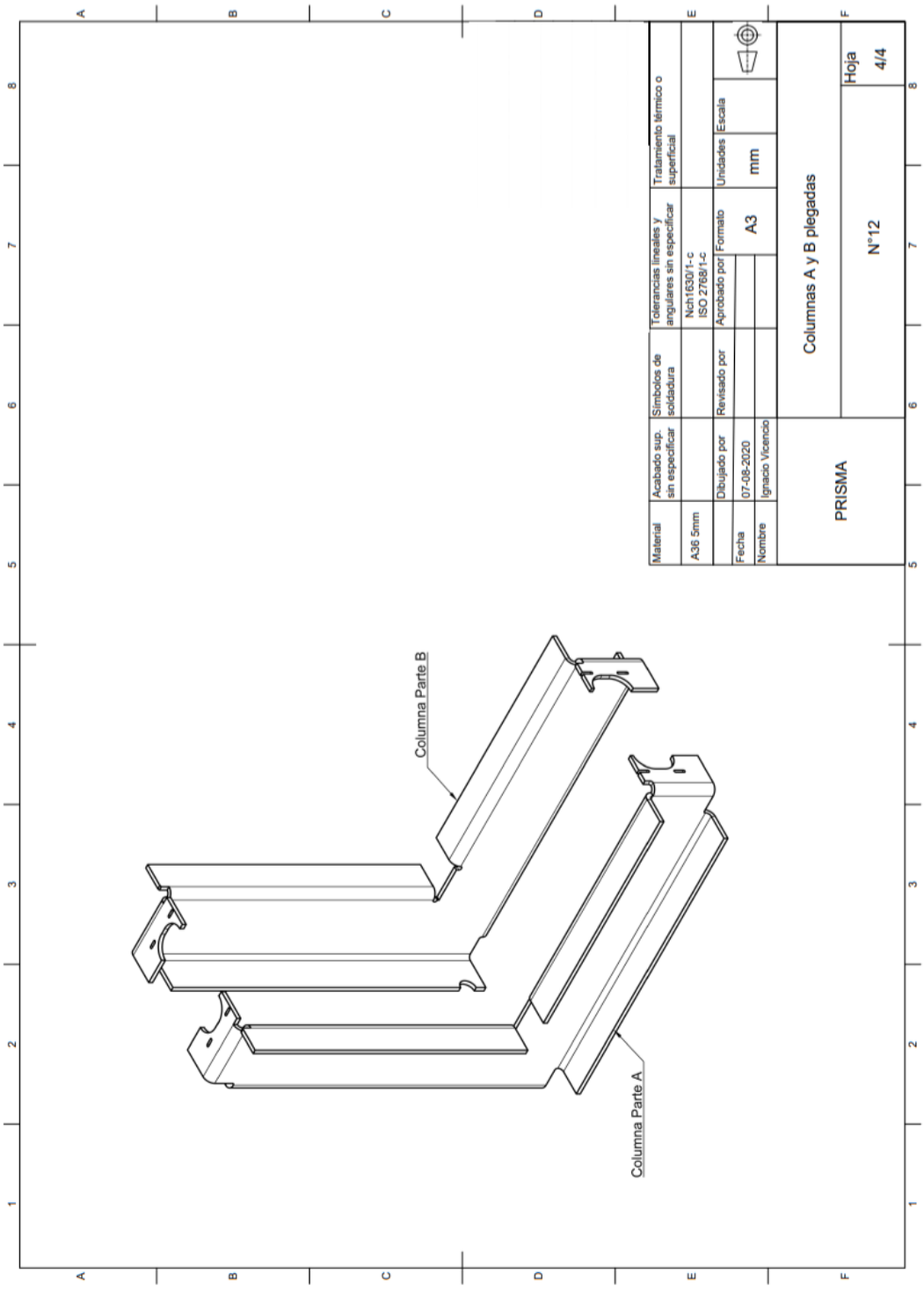


Tabla de plegado
N° | Dirección | Ángulo | Radio
1 | Arriba ↑ | 90° | 5mm
2 | Abajo ↓ | 90° | 5mm
3 | Arriba ↑ | 90° | 5mm
4 | Abajo ↓ | 90° | 5mm
5 | Arriba ↑ | 90° | 5mm
6 | Abajo ↓ | 90° | 5mm
Material
A36 5mm
Acabado sup. sin especificar
Símbolos de soldadura
Tolerancias lineales y angulares sin especificar
Nch1630/1-c
ISO 2768/1-c
Tratamiento térmico o superficial
Dibujado por
Fecha
07-08-2020
Nombre
Ignacio Vicencio
Revisado por
Aprobado por
Formato
A3
Unidades
mm
Escala
1:3
PRISMA
Plegado Columna Parte B
N°10
Hoja
2/4
40
33
2
3
4
5
6

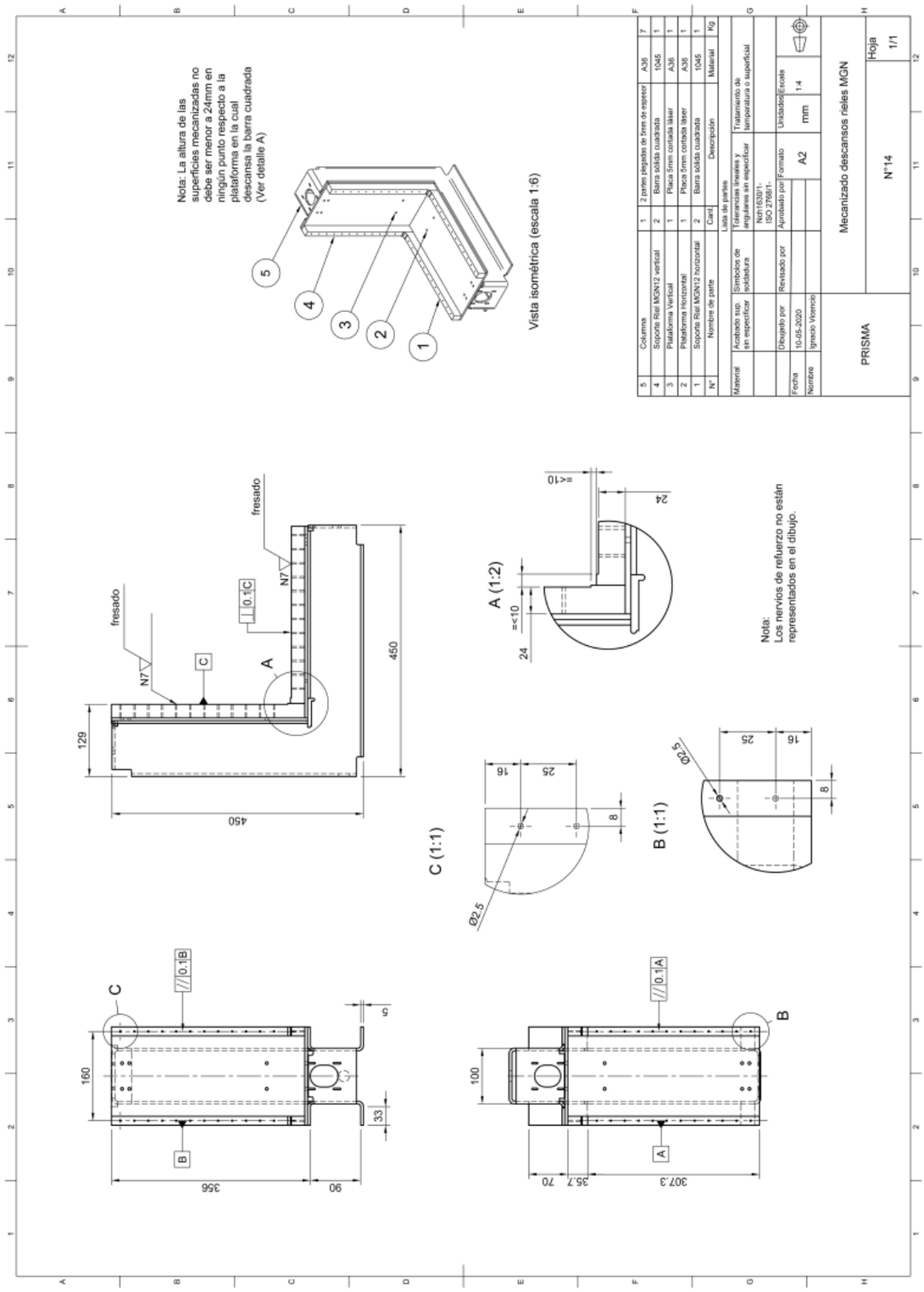


Nota:
Las indicaciones son válidas para ambas partes A y B

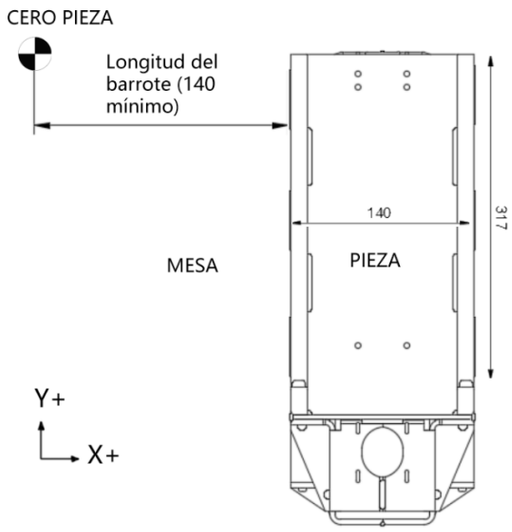
Material	Acabado sup. sin especificar	Símbolos de soldadura	Tolerancias lineales y angulares sin especificar	Tratamiento térmico o superficial		
A36 5mm			Nch1630/1- c ISO 2768/1-c			
	Dibujado por	Revisado por	Aprobado por	Formato	Unidades	Escala
Fecha	07-08-2020			A3	mm	
Nombre	Ignacio Vicencio					
PRISMA	Tolerancias geométricas Columna Parte A					
	N°11				Hoja 3/4	


Columna Parte B
Columna Parte A
Material
A36 5mm
Acabado sup. sin especificar
Símbolos de soldadura
Tolerancias lineales y angulares sin especificar
Nch1630/1-c
ISO 2768/1-c
Tratamiento térmico o superficial
Dibujado por
Revisado por
Aprobado por
Formato
A3
Unidades
mm
Escala
Fecha
07-08-2020
Nombre
Ignacio Vicencio
PRISMA
Columnas A y B plegadas
N°12
Hoja
4/4

ANEXO K: Rectificado de la estructura



ANEXO L: Programa de planeado CNC

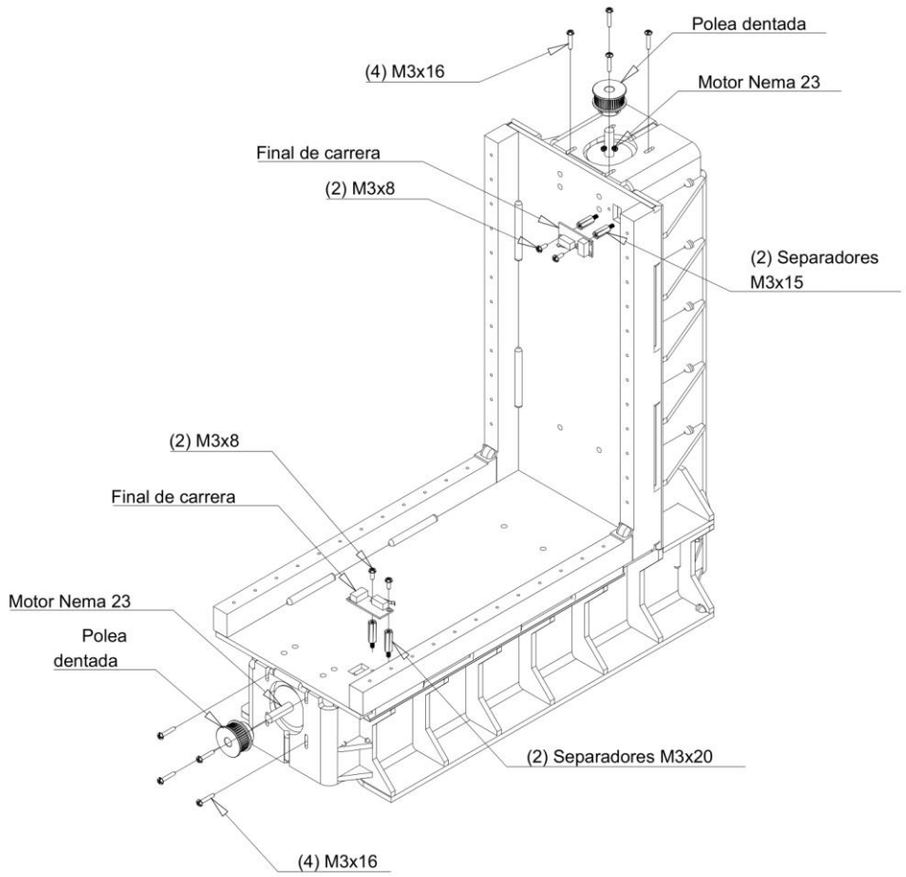


Montaje de la pieza dentro del centro de mecanizado vista desde arriba.

```
O5201 ;
M06 T02
G28 G90 Z0 ;
M03 S100 ;
G90 ;
G54 Z10
G01 X0 Y150.0 F400 ;
10G43 Z10 H02 ;
G01 Z-1.2 F100 ;
G01 X315.0 F40 ;
Z10.0 ;
X0 F300 ;
Y0 F300 ;
Z-1.2 ;
G01 X315.0 F40 ;
Z10.0 ;
Y0 F300 ;
X0 F300 ;
M30 ;
%
```

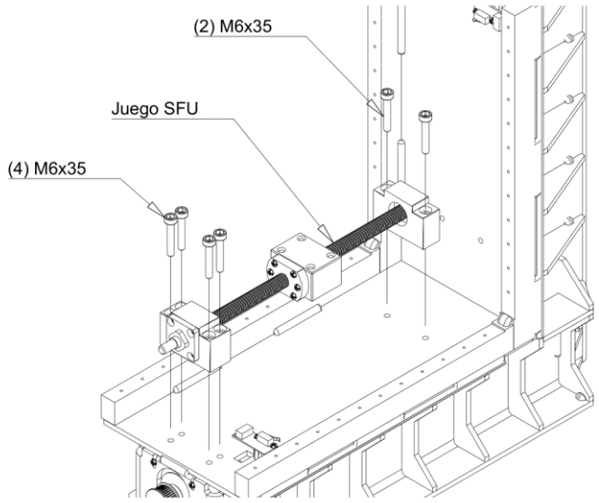
ANEXO M: Instrucciones de ensamblaje

PASO 1



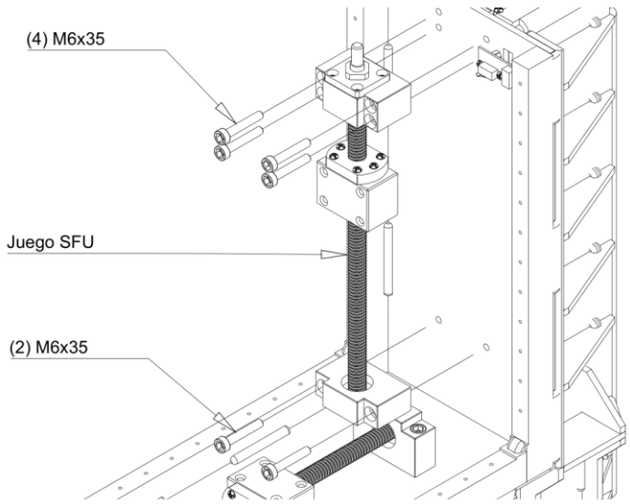
Montar motores Nema 23 y atornillar. También montar finales de carrera con separadores. Nótese que la medida de los separadores es diferente para cada eje.

PASO 2



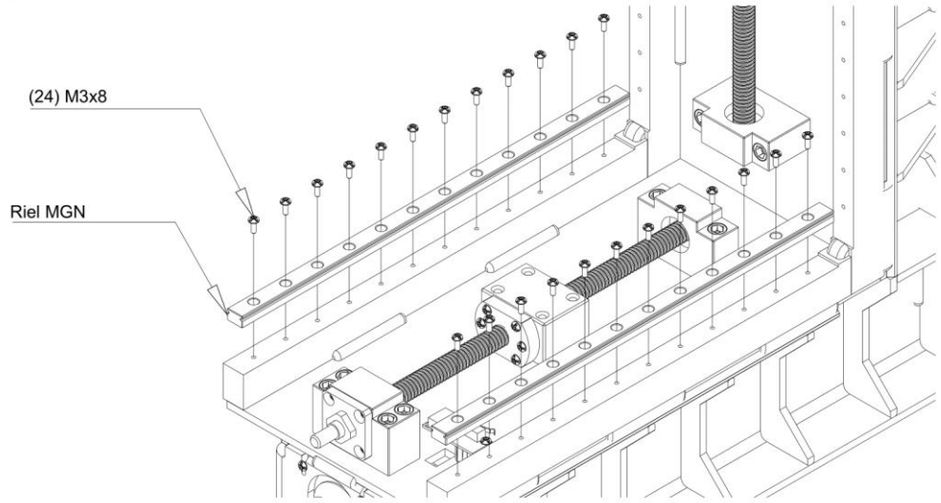
Montar transmisión ya ensamblada (Juego SFU) y atornillar.

PASO 3



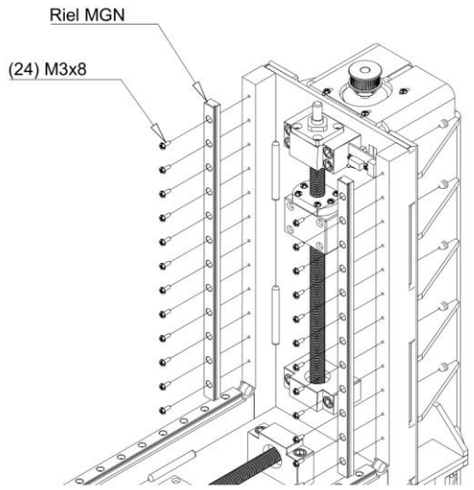
Hacer lo mismo en el plano restante. Apoyar columna en su cara posterior para mayor facilidad.

PASO 4



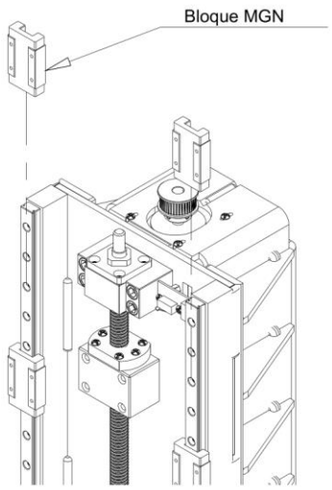
Montar rieles MGN y atornillar.

PASO 5



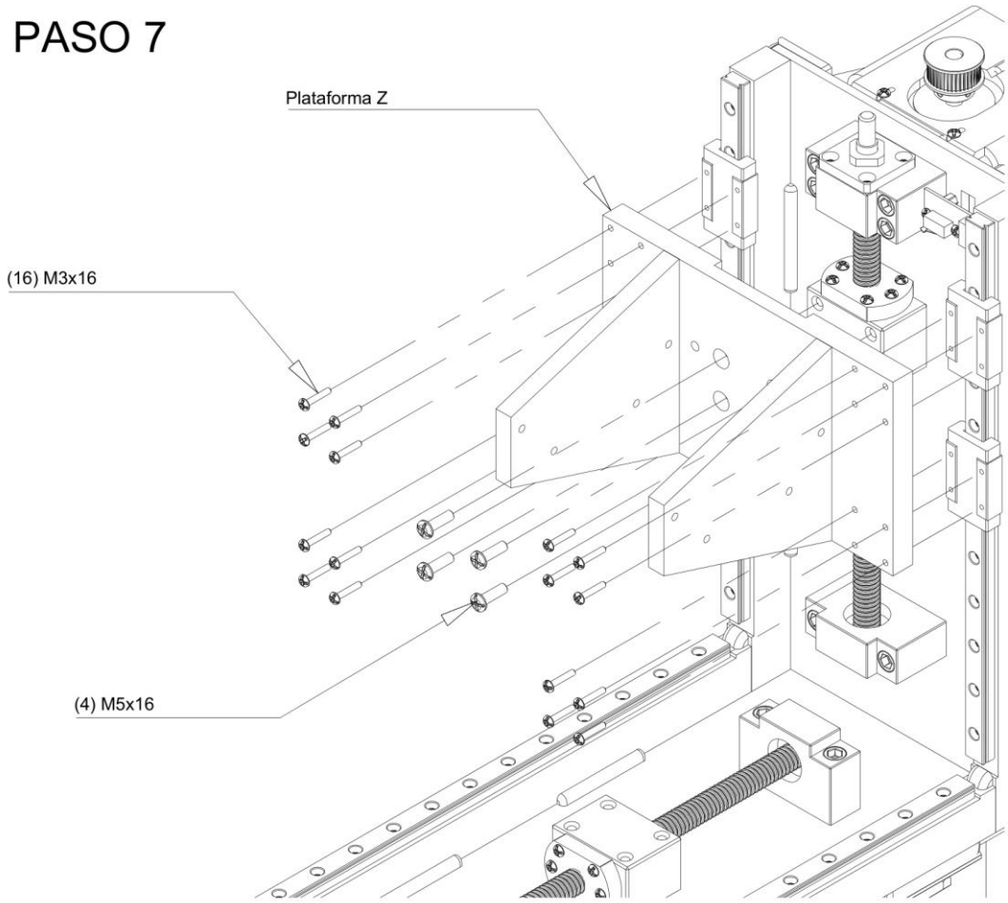
Montar los rieles en el plano restante.

PASO 6



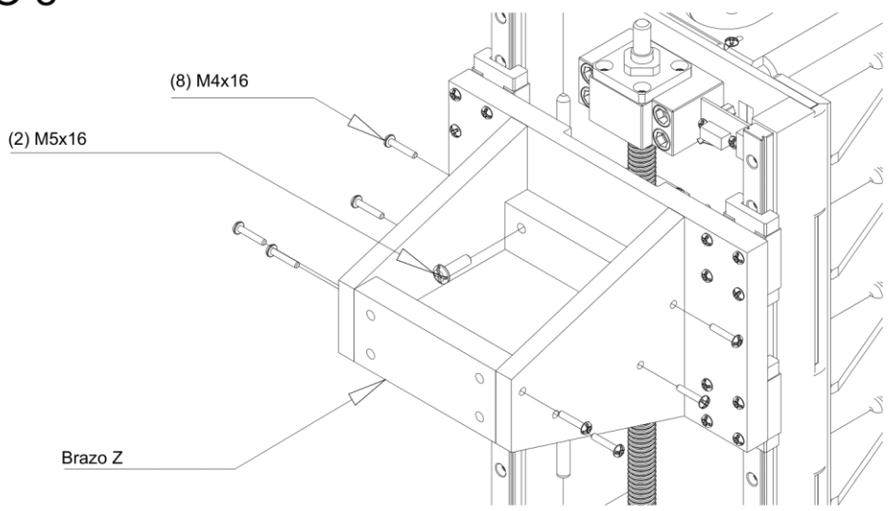
Insertar bloques MGN en los rieles. Dos por lado.

PASO 7



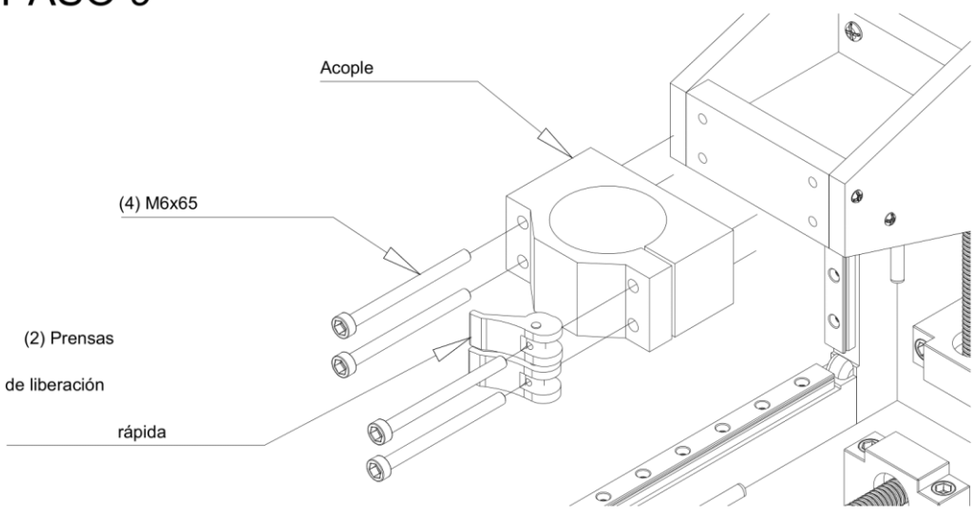
Montar Plataforma Z con Refuerzos ya ensamblados y atornillados. Si se realiza verticalmente, ubicar pieza de bloqueo en el riel para mantener la posición del conjunto.

PASO 8



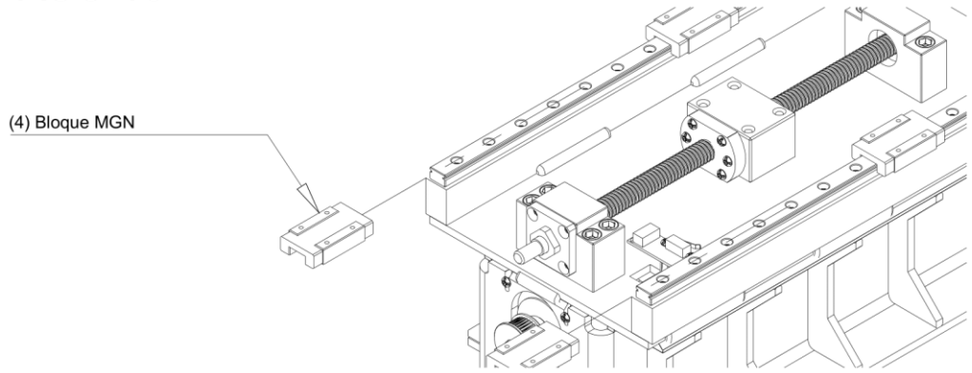
Ubicar Brazo Z y atornillar.

PASO 9



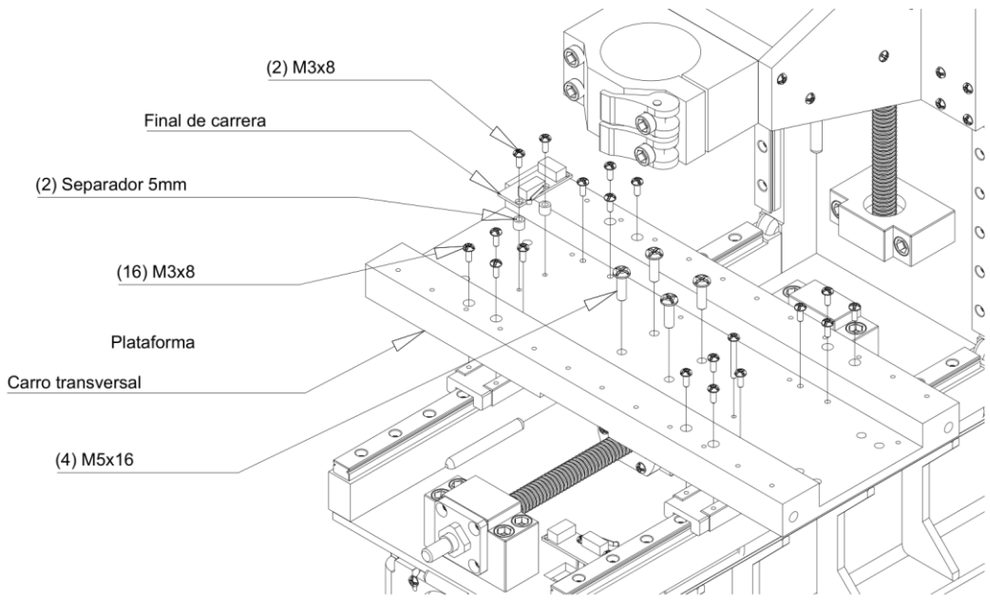
Montar Acople y apernar con las prensas de liberación rápida.

PASO 10



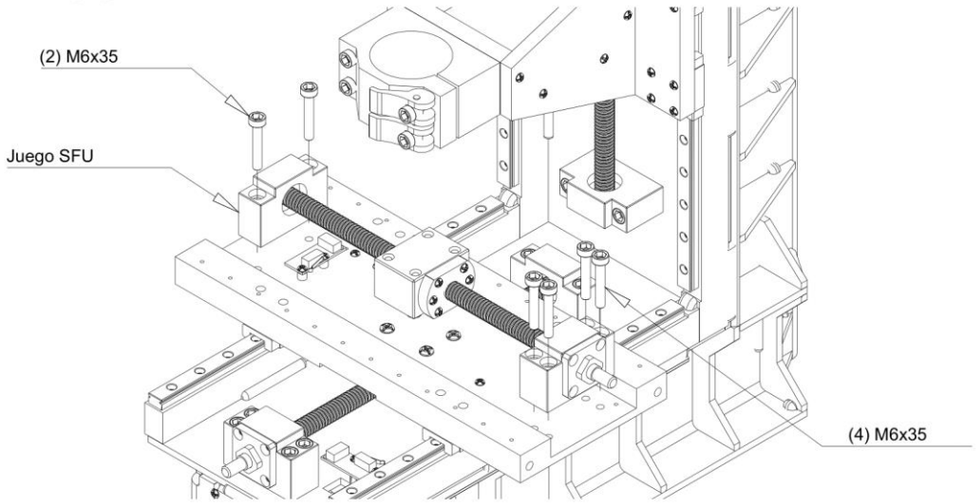
Insertar bloques MGN en los rieles horizontales. Dos por lado.

PASO 11



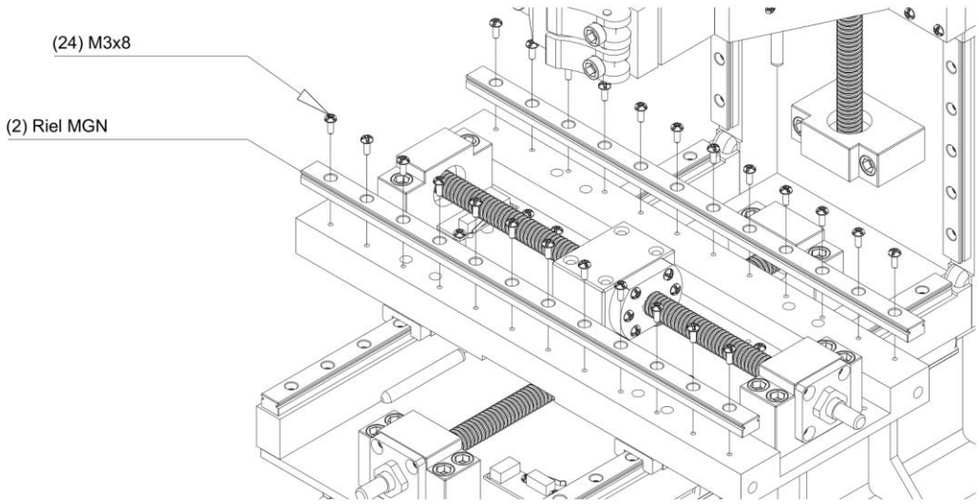
Montar Plataforma Carro Transversal y atornillarla a los bloques MGN y al Bloque de Tuerca SFU..
Montar, además, final de carrera con sus respectivos separadores.

PASO 12



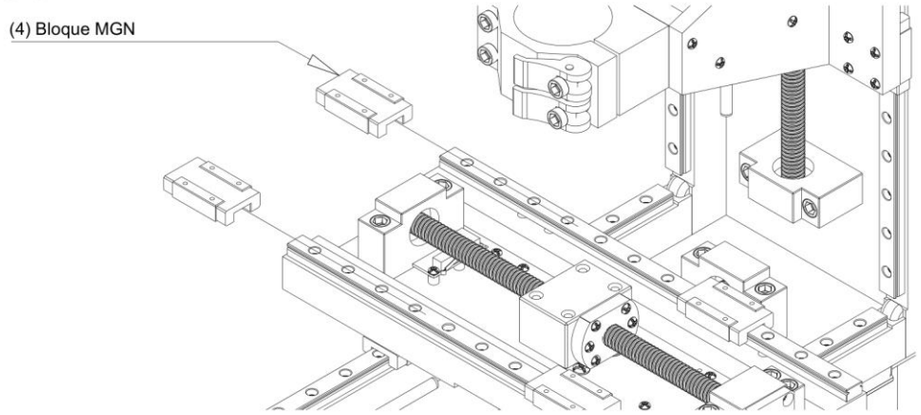
Montar la transmisión perteneciente al Carro Transversal y atornillar.

PASO 13



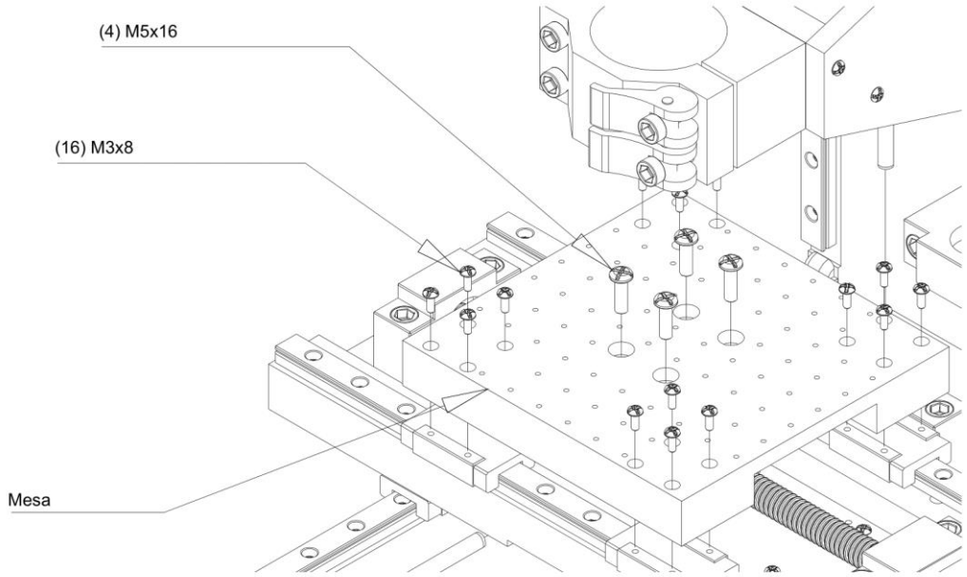
Montar los rieles MGN y atornillar.

PASO 14



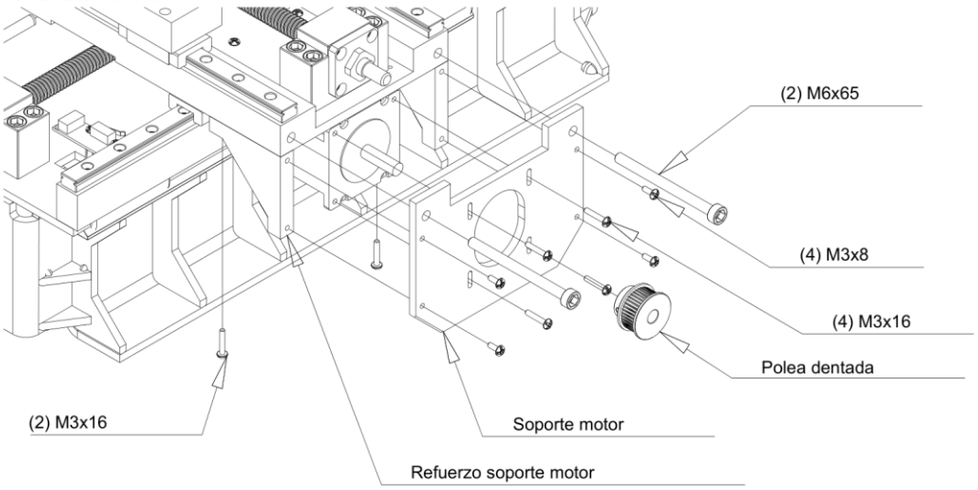
Insertar bloques MGN en los rieles. Dos por cada lado.

PASO 15



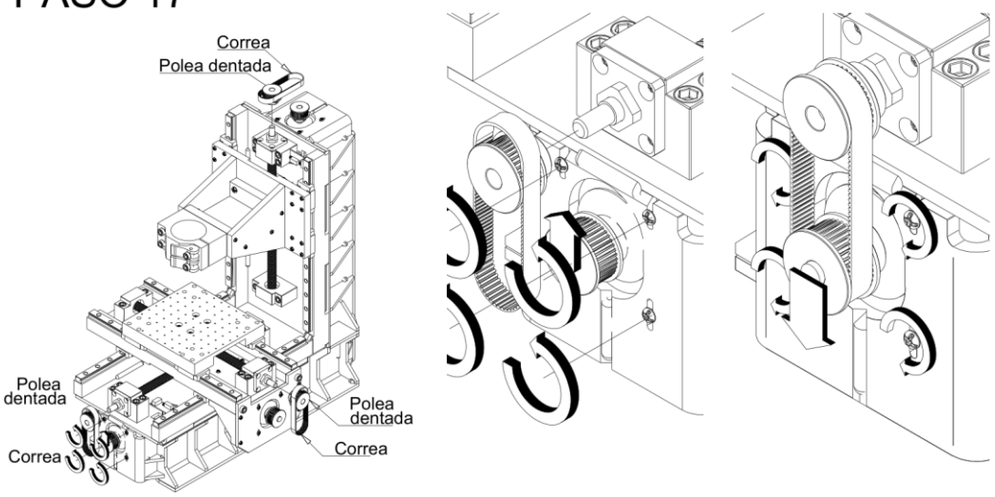
Alinear los bloques debajo de la Mesa y atornillar. Atornillar también al Bloque de Tuerca SFU.

PASO 16



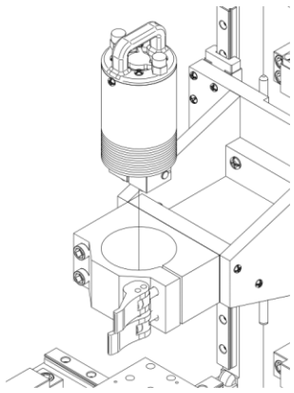
Montar el Soporte Motor y atornillar. Montar por detrás el motor Nema 23 y atornillar. Luego montar refuerzos laterales y atornillar. Finalmente, insertar la polea dentada en el eje del motor, alineando las dos caras externas de la polea y del eje.

PASO 17

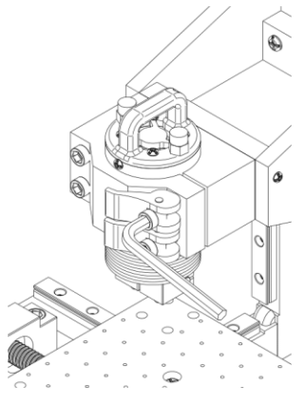


Montar las poleas dentadas restantes en los extremos de las transmisiones. Soltar los tornillos que sujetan los motores levemente para poder deslizar el motor hacia arriba y, una vez insertada la polea y la correa en su lugar, tensar desplazando el motor hacia abajo y fijar apretando los tornillos.

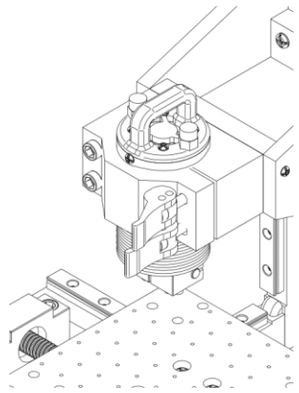
PASO 18



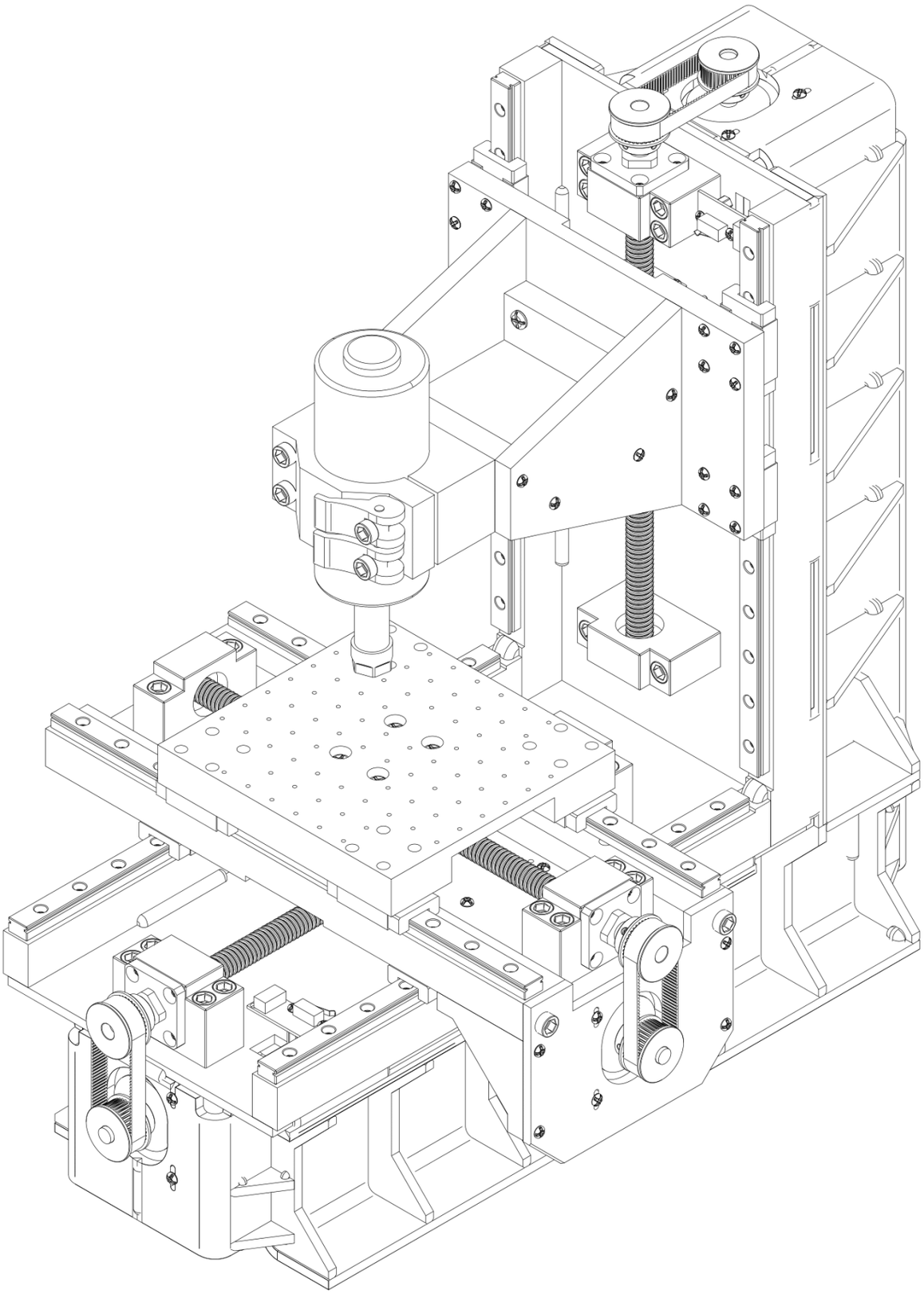
Insertar Cabezal de trabajo en Acople.



Cerrar prensas y apretar tornillos con fuerza moderada.



Verificar que la liberación se pueda realizar con facilidad pero empleando una cierta cantidad de esfuerzo. Repetir el proceso las veces que sea necesario.

LISTO.

ANEXO N: Dibujo máquina "Prisma CNC"