

Desarrollo de máquina multifuncional para la producción de drones en PYMES agrícolas de Colombia.

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecatrónico

Ingry Dayana Casallas Herrera,

Duvan Stiven Peña Castellanos.

Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecatrónica

Facatativá, Cundinamarca

Septiembre de 2024

Desarrollo de máquina multifuncional para la producción de drones en PYMES agrícolas de Colombia.

Ingry Dayana Casallas Herrera,

Duvan Stiven Peña Castellanos.

Director de documento:

Ing. Camilo Sarmiento

Co- director de documento:

Ing. Luis Alexander Ramírez

Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Mecatrónica

Facatativá, Cundinamarca

Septiembre de 2024

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	9
2. JUSTIFICACIÓN.....	13
3. OBJETIVOS .....	18
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	18
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
4. MARCO REFERENCIAL.....	19
4.1. ESTADO DEL ARTE.....	19
4.1.1. REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS RELEVANTES.....	19
4.2. MARCO HISTÓRICO .....	23
4.3. MARCO TEÓRICO .....	26
4.4. MARCO CONCEPTUAL .....	33
4.5. MARCO LEGAL .....	39
5. DISEÑO METODOLÓGICO .....	41
5.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO .....	43
6. DESARROLLO INGENIERIL.....	46
6.1. MATERIALES.....	46
6.1.1. MÓDULO ELASTICIDAD Y LÍMITE ELÁSTICO .....	49
6.1.2. ACERO ASTM A36.....	51
6.2. DISEÑO MECANICO.....	52
6.3. DIMENSIONES DE EJES .....	55
6.4. ENSAMBLE .....	59
6.5. ANALISIS ESTATICO .....	61
6.6. DISEÑO ELECTRICO .....	77
6.7. HERRAMIENTAS .....	84
6.8. TORQUE .....	93
6.9. SELECCIÓN DEL MOTOR .....	102
6.10. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	105
6.11. ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN .....	108
7. RECURSOS DISPONIBLES.....	113

<b>7.1. ANALISIS DE COSTOS.....</b>	<b>118</b>
<b>8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>121</b>
<b>9. ALCANCES Y LIMITACIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>10. CRONOGRAMA.....</b>	<b>131</b>
<b>11. CONCLUSIONES.....</b>	<b>133</b>
<b>12. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>135</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>139</b>
<b>14. ANEXOS.....</b>	<b>149</b>

## TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Cabezal 3D para CNC y láser [Imagen]. (s.f.). Cults3D.</i>	29
Ilustración 2. Filamento PLA azul claro [Imagen]. (2021). ZuluPrints.	29
Ilustración 3. Controlador A4988 [Imagen]. (2016). Aranacorp.	30
Ilustración 4. Extrusor MK8 [Imagen]. (s.f.). Dualtronica.	30
Ilustración 5. RAMPS 1.4 con 5 drivers A4988 [Imagen]. (s.f.). FlyRobo.	31
Ilustración 6. Motor nema 17 [Imagen]. (s.f.). Lin Engineering.	31
Ilustración 7. Cama calentada de aluminio [Imagen]. (s.f.). Amazon.	31
Ilustración 8. Convertidor de conmutación LEDMO [Imagen]. (s.f.). Mercado Libre.	32
Ilustración 9. Comparativa de las arquitecturas serie y paralela para máquinas CNC.	36
Ilustración 10. Uso de un dron para monitorización de terrenos agrícolas.	38
Ilustración 11. Diagrama de flujo del diseño metodológico.	41
Ilustración 12. Requerimientos de diseño	45
Ilustración 13. Aluminio, dura aluminio y acero astm a36.	47
Ilustración 14. Diseño CAD mecánico	52
Ilustración 15. Etapas del diseño mecánico	54
Ilustración 16. Cotas del eje X.	55
Ilustración 17. Cotas del eje Y.	56
Ilustración 18. Cotas del eje Z.	57
Ilustración 19. Vistas del prototipo diseñado en Solidworks.	60
Ilustración 20. Definición estándar para el análisis estático.	61
Ilustración 21. Aplicación de fuerzas sobre la mesa de trabajo con 12Kgf.	62
Ilustración 22. Análisis de desplazamiento de la mesa de trabajo con 12Kgf.	63
Ilustración 23. Punto de deformación más crítico con 12Kgf.	64
Ilustración 24. Análisis de tensión de la mesa de trabajo con 12Kgf.	65
Ilustración 25. Aplicación de fuerzas sobre la mesa de trabajo con 10Kgf.	66
Ilustración 26. Análisis de desplazamiento de la mesa de trabajo con 10Kgf.	67
Ilustración 27. Análisis de tensión de la mesa de trabajo con 10Kgf.	68
Ilustración 28. Aplicación de fuerzas sobre los 4 puntos de trabajo con 40Kgf.	70
Ilustración 29. Análisis de desplazamiento de los cuatro puntos de trabajo con 40Kgf.	71
Ilustración 30. Análisis de tensión de los cuatro puntos de trabajo con 40Kgf.	71

Ilustración 31. Análisis de desplazamiento del eje X y Y con 5kgf. ....	73
Ilustración 32. Análisis de tensión del eje X y Y con 5kgf.....	73
Ilustración 33. Análisis de desplazamiento del eje X y Y con 2.5kgf. ....	74
Ilustración 34. Análisis de tensión del eje X y Y con 2.5kgf.....	75
Ilustración 35. Diagrama eléctrico eje X .....	77
Ilustración 36. Diagrama eléctrico eje Y .....	79
Ilustración 37. Diagrama eléctrico eje Z.....	81
Ilustración 38. Diagrama eléctrico del extrusor .....	84
Ilustración 39. Diagrama eléctrico del Heat Bed. ....	87
Ilustración 40. Diagrama eléctrico del láser. ....	89
Ilustración 41. Diagrama eléctrico del husillo. ....	91
Ilustración 42. Motor 17HS4401. ....	103
Ilustración 43. Fuente de alimentación S-480-12. ....	106
Ilustración 44. Algoritmo programación Marlin.....	109
Ilustración 45. Algoritmo programación GRBL.....	112
Ilustración 46. Evolución de la construcción del prototipo de máquina multifuncional. ....	121
Ilustración 47. Señalización de seguridad.....	122
Ilustración 48. Productos obtenidos de la máquina multifuncional.....	123
Ilustración 49. Frame del drone obtenido por el corte láser. ....	124
Ilustración 50. Toma de datos de la precisión dimensional de la impresión 3D. ....	125
Ilustración 51. Cubo XYZ análisis de la superficie.....	126
Ilustración 52. Grabado CNC sobre PCB usando Motor Tool. ....	127
Ilustración 53. Soporte para motores del Drone por medio de Impresión 3D de PETG. ....	128
Ilustración 54. Accesorios creados mediante impresión 3D para el prototipo. ....	128

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de materiales.....	46
Tabla 2. Comparación del módulo de elasticidad y límite elástico .....	49
Tabla 3. Resumen de análisis de la mesa de trabajo con 10kgf y 12kgf.....	69
Tabla 4. Resumen de análisis de los cuatro puntos de trabajo con 40kgf.....	72
Tabla 5. Resumen de análisis de la varilla del eje X y Y con 5kgf y 2.5kgf. ....	76
Tabla 6. Características de los movimientos y el torque de los ejes. ....	102
Tabla 7. Requerimientos de la fuente de alimentación. ....	105
Tabla 8. Costos de recursos para fabricar la máquina multifuncional. ....	113
Tabla 9. Costos de máquinas de impresión 3D, corte láser y mecanizado PCB.....	118
Tabla 10. Toma de datos de la precisión dimensional del corte láser.....	124
Tabla 11. Cronograma del desarrollo del producto. ....	131
Tabla 12. Empresas líderes globales en drones agrícolas. ....	149
Tabla 13. Empresas que fabrican drones agrícolas en Colombia. ....	149

## RESUMEN

En la actualidad, la demanda de soluciones tecnológicas accesibles y eficientes en el ámbito de la producción agrícola, particularmente en la fabricación de piezas para drones, está en constante aumento. Las pequeñas y medianas empresas (PYMES) en Colombia enfrentan limitaciones en el acceso a maquinaria adecuada, lo que limita su capacidad para innovar y competir en un mercado cada vez más exigente. Con el objetivo de satisfacer esta necesidad, se desarrolló una máquina multifuncional capaz de realizar operaciones de impresión 3D, corte láser y mecanizado de PCB, ofreciendo una alternativa económica y versátil para estas empresas.

La construcción del prototipo parte en base a el diseño asistido por computadora (CAD) utilizando SolidWorks, y la realización de pruebas de estáticas y posterior construcción del diseño con el fin de validar el funcionamiento de la máquina. Una vez se construyó el prototipo se realizaron diferentes operaciones en base a las funciones de impresión 3D, corte láser y mecanizado de PCB. Los resultados de estas pruebas mostraron que la máquina multifuncional no solo cumplía con los objetivos planteados, sino que también demostraba una notable versatilidad y eficiencia en la realización de las operaciones. El análisis estático confirmó que el diseño es estructuralmente sólido, capaz de soportar las condiciones de operación simuladas. Sin embargo, se identificaron limitaciones en el control de vibraciones, las cuales se hicieron evidentes al incrementar la velocidad de operación. A pesar de este inconveniente, el prototipo operó de manera óptima, cumpliendo con la fabricación de las piezas esperadas.

La máquina multifuncional representa una solución viable para las PYMES agrícolas, facilitando la producción de piezas personalizadas para drones. La capacidad de la máquina para realizar múltiples funciones en un solo equipo no solo reduce costos operativos, sino que también permite a las empresas adaptarse a diversas necesidades productivas. Además, se sugiere la implementación de mejoras en el control de vibraciones, lo que podría optimizar aún más la velocidad y la precisión en los movimientos, aumentando la efectividad de la máquina en entornos industriales.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, las pequeñas y medianas empresas (PYMES) agrícolas de Colombia enfrentan serios desafíos para mantenerse competitivas en el contexto de la agricultura de precisión, una metodología que optimiza el uso de recursos mediante el empleo de soluciones avanzadas como los drones. Estas herramientas permiten una gestión más eficiente de los cultivos al ofrecer datos en tiempo real sobre el estado del terreno, las necesidades de riego, la presencia de plagas y enfermedades, entre otros factores críticos para maximizar la producción agrícola. Sin embargo, la adopción de estas soluciones por parte de las PYMES colombianas es limitada, lo cual impacta de manera negativa su productividad y competitividad frente a otros mercados globales más tecnificados.

De acuerdo con un estudio realizado por la Asociación Colombiana de Pequeños y Medianos Empresarios (ACOPI), el 68% de las PYMES agrícolas en el país carecen de los recursos financieros necesarios para invertir en sistemas de agricultura de precisión, entre los que se destacan los drones (ACOPI, 2021). Además, un alto porcentaje de estas empresas presenta deficiencias en términos de capacitación técnica y acceso a la información sobre las soluciones más recientes, lo cual constituye una barrera significativa para la adopción efectiva. Estas dificultades no solo limitan el acceso a los beneficios de la agricultura de precisión, sino que también perpetúan un ciclo de baja productividad, altas pérdidas de insumos y menor rentabilidad en el sector agrícola.

El mercado colombiano de drones ha mostrado un crecimiento notable en los últimos años. En 2023, se estimó que este mercado alcanzó un valor de 8.12 millones de dólares, impulsado en gran medida por la creciente adopción de drones en sectores como la agricultura, la inspección de infraestructuras y el monitoreo ambiental (Statista, 2023). A pesar de este crecimiento, la industria de drones en Colombia enfrenta importantes obstáculos que limitan su desarrollo. Entre ellos se destaca la dependencia de la importación de drones y componentes esenciales desde países como

China, Estados Unidos y Europa, lo que incrementa significativamente los costos operativos de las PYMES que buscan implementar estas soluciones. Además, la falta de infraestructura local para la fabricación de drones y la escasa inversión en investigación y desarrollo (I+D) dentro del país impiden el crecimiento de una industria nacional competitiva en este ámbito (Aviación No Tripulada UA, 2023).

Actualmente, solo unas pocas empresas colombianas se dedican a la producción de drones agrícolas, entre ellas Drones Colombia SAS, Helicol e Ikaró Drones Agrícolas. Esta situación revela una brecha considerable en la capacidad de producción local, lo que impide que las PYMES puedan acceder a soluciones ajustadas a sus necesidades específicas y a precios competitivos (ANIF, 2021). La dependencia de tecnologías y componentes importados no solo genera costos elevados, sino que también reduce la capacidad de las empresas colombianas para innovar y adaptar estas herramientas a las condiciones particulares de la agricultura en el país, lo que disminuye su competitividad en el mercado internacional. Además, se estima que las PYMES del sector manufacturero destinan alrededor del 30% de sus costos operativos a la importación de insumos tecnológicos (ANIF, 2021), lo que aumenta su vulnerabilidad frente a fluctuaciones en los precios internacionales y disrupciones en la cadena de suministro.

Otro factor crítico que limita el desarrollo de la industria de drones en Colombia es la falta de una regulación clara y actualizada para el uso de drones en Colombia ha sido un desafío para el crecimiento del sector. "La normativa actual no contempla los avances tecnológicos más recientes y las nuevas aplicaciones de los drones, lo que genera incertidumbre y dificulta la adopción de estas tecnologías por parte de las empresas" (Aeronáutica Civil de Colombia, 2020). Este vacío regulatorio obstaculiza la adopción de sistemas avanzados y crea un entorno de riesgo para las inversiones en esta industria.

Frente a estos desafíos, surge la necesidad urgente de desarrollar capacidades locales que permitan a las PYMES colombianas reducir su dependencia de proveedores externos y mejorar su

capacidad para fabricar drones y componentes de manera autónoma. En este contexto, una posible solución es el diseño y desarrollo de una máquina multifuncional que integre tecnologías avanzadas como la impresión 3D, el mecanizado de PCB (placas de circuito impreso) y el corte láser. Esta máquina estaría destinada a facilitar la fabricación de drones agrícolas a bajo costo, adaptando los diseños a las necesidades específicas de los agricultores locales.

El desarrollo de una máquina multifuncional con estas características no solo reduciría los costos de producción, sino que también permitiría una mayor flexibilidad y personalización en los procesos de fabricación, adaptándose a las condiciones y requerimientos específicos de cada agricultor. Como señala la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021), los drones representan una herramienta clave para mejorar la gestión agrícola al proporcionar datos precisos y en tiempo real sobre los cultivos, lo que permite una toma de decisiones más informada y eficiente. En este sentido, una máquina que permita fabricar localmente los componentes de los drones, tales como la estructura, las placas de circuito impreso y las carcasas, sería un avance significativo para la industria manufacturera nacional y el sector agrícola.

Además, la arquitectura cinemática en serie propuesta para la máquina multifuncional ofrece ventajas técnicas en términos de volumen de trabajo y facilidad de mantenimiento, lo que la convierte en una opción ideal para las PYMES colombianas (Ramírez, López, & Hernández, 2023). La implementación de esta tecnología permitiría a las empresas locales producir drones de manera más rápida y económica, fomentando la innovación y el desarrollo de soluciones ajustadas a las necesidades del mercado colombiano.

En resumen, el problema identificado radica en la incapacidad de las PYMES agrícolas colombianas para acceder y adoptar herramientas avanzadas como los drones debido a la falta de recursos financieros, técnicos y de infraestructura local. El desarrollo de una máquina multifuncional que permita fabricar drones de manera eficiente y a bajo costo representa una solución viable para

reducir la dependencia de proveedores extranjeros, mejorar la competitividad de las PYMES y promover la adopción de la agricultura de precisión en el país.

Con todo ello surge la siguiente pregunta problema: *¿Cómo se puede diseñar y desarrollar una máquina multifuncional que integre impresión 3D, mecanizado de PCB y corte láser para permitir a las PYMES agrícolas colombianas producir componentes de drones de manera económica y eficiente, reduciendo su dependencia tecnológica y mejorando su competitividad en la agricultura de precisión?*

## 2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de una máquina multifuncional que integre impresión 3D, corte láser y mecanizado para PCB representa una solución innovadora para abordar los desafíos que enfrentan las pequeñas y medianas empresas (PYMES) colombianas dedicadas a la agricultura de precisión en relación con la fabricación local de drones y sus componentes estratégicos. Esta iniciativa tiene el potencial de generar un impacto trascendental en diversos ámbitos, desde el fortalecimiento de la industria manufacturera nacional hasta la promoción de la sostenibilidad agrícola y la transferencia de conocimientos tecnológicos.

En primer lugar, es fundamental resaltar que “Colombia posee 2.540.953 MiPymes, que representan el 90 % de las empresas del país, producen solo el 30 % del PIB y emplean más del 65 % de la fuerza laboral nacional” como dice la Asociación Colombiana de Empresas de Tecnología e Innovación Financiera en (Ladino Fernández, Briceño Barrero, & Rodríguez Rojas, 2022). Sin embargo, estas empresas se enfrentan a retos significativos, como la alta dependencia de tecnologías y componentes importados, lo que limita su capacidad de innovación y competitividad en el mercado global. Según un estudio del Centro de Estudios para el Desarrollo Exportador (CEDEX), Las pequeñas y medianas empresas (Pymes) enfrentan diversos obstáculos en su camino hacia el crecimiento y desarrollo, entre los que se encuentran el acceso limitado al financiamiento, las restricciones tecnológicas, el desarrollo inadecuado de recursos humanos y las dificultades para establecer redes de contactos a nivel nacional (Orlandi, 2021). Para los empleados, las limitaciones tecnológicas y de financiamiento suelen traducirse en una falta de oportunidades para el desarrollo profesional y la adquisición de nuevas habilidades. La falta de inversión en capacitación y actualización tecnológica puede limitar su crecimiento personal dentro de la empresa, afectando su empleabilidad y reduciendo sus posibilidades de ascender en el mercado laboral. Además, la inestabilidad financiera de muchas

Pymes puede llevar a una alta rotación de personal, afectando la estabilidad laboral y, en ocasiones, las condiciones de trabajo. Por otro lado, los empresarios, debido a las restricciones en acceso a financiamiento y tecnología, enfrentan dificultades para implementar estrategias de crecimiento, lo que frena su capacidad de innovación y expansión. Esto los obliga a competir en condiciones de desventaja frente a grandes empresas o actores internacionales con mayores recursos. La falta de redes de contactos a nivel nacional también dificulta la posibilidad de crear alianzas estratégicas, acceder a nuevos mercados o integrar cadenas de valor más amplias, lo que agrava su situación competitiva. Los consumidores también son afectados por estas limitaciones, las Pymes, al no poder acceder a tecnologías avanzadas o fuentes de financiamiento adecuadas, pueden ver comprometida la calidad y diversidad de los productos y servicios que ofrecen. Esto genera un impacto directo en la oferta disponible para los consumidores, quienes podrían enfrentarse a precios más altos, menor calidad o un acceso limitado a productos innovadores. Esta situación expone a las pequeñas y grandes empresas a fluctuaciones en los precios internacionales y disrupciones<sup>1</sup> en las cadenas de suministro, impactando negativamente su rentabilidad y sostenibilidad.

En este contexto desafiante, el desarrollo de una máquina multifuncional capaz de fabricar localmente componentes esenciales para drones, como la estructura, el frame y los brazos mediante impresión 3D, las placas de circuito impreso (PCB) a través de mecanizado, y las carcasas y piezas adicionales con corte láser, representa una oportunidad única para reducir la dependencia tecnológica del exterior y fortalecer la industria manufacturera colombiana. Se infiere que el fomento de la producción local de componentes y piezas para la industria de drones impulsará el crecimiento del sector manufacturero nacional, generando empleos calificados y promoviendo la transferencia de conocimiento tecnológico.

Además, la adopción de tecnologías de agricultura de precisión, como los drones, ha demostrado ser una herramienta invaluable para optimizar los recursos y mejorar la productividad agrícola. Un

---

<sup>1</sup> Disrupción: una interrupción o rompimiento con la manera tradicional de ejecutar algo

estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) señala que los drones han probado ser una solución eficaz en la agricultura de precisión, permitiendo el monitoreo preciso de cultivos, la aplicación eficiente de insumos y la optimización de recursos (Pino, 2019). Sin embargo, las PYMES agrícolas en Colombia consideran que una de las dificultades para su sector es: el acceso al crédito, el cual es inferior al 20% del total (45% en general de las pymes) (Rivera Cuervo & Rincón Gómez, 2018).

La máquina multifuncional propuesta busca abordar estas limitaciones al permitir la fabricación local de drones y sus componentes estratégicos, adaptados a las necesidades específicas de los agricultores colombianos. Esto no solo reduciría los costos asociados a la importación de tecnologías, sino que también promovería la transferencia de conocimientos y el desarrollo de capacidades locales en el campo de la fabricación avanzada, fortaleciendo la competitividad de las PYMES y fomentando la innovación.

Asimismo, esta iniciativa contribuiría al fortalecimiento de la seguridad alimentaria<sup>2</sup> y la sostenibilidad agrícola en el país. Al facilitar la adopción de drones para la agricultura de precisión, se optimizaría el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas, reduciendo el impacto ambiental y aumentando la eficiencia de los cultivos. Esto es especialmente relevante en un contexto de cambio climático y escasez de recursos, donde la productividad agrícola sostenible es fundamental para garantizar el suministro de alimentos a la creciente población colombiana.

Otro aspecto clave de esta propuesta es su alineación con las políticas institucionales y las prioridades nacionales en materia de desarrollo industrial y tecnológico. El gobierno colombiano ha identificado la necesidad de fortalecer la industria manufacturera y fomentar la transferencia de conocimientos tecnológicos como estrategias clave para impulsar el crecimiento económico y la

---

<sup>2</sup> Seguridad alimentaria: En la Cumbre Mundial sobre la Alimentación de 1996 (PDF) se definió que la seguridad alimentaria existe cuando todas las personas tienen, en todo momento, acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfacen sus necesidades energéticas diarias y preferencias alimentarias para llevar una vida activa y sana.

competitividad del país.

El desarrollo de un prototipo de esta máquina multifuncional de fabricación digital representa una oportunidad con amplia justificación técnica, económica y social para el país. Técnicamente, permitiría avanzar en el dominio interno de tecnologías indispensables en procesos de manufactura moderna e impulsar la sofisticación industrial<sup>3</sup> del país como sugieren Pérez y Gutiérrez (2021). Económicamente, se lograría sustitución de importaciones de maquinaria y componentes críticos con impacto positivo en la balanza comercial, tal como argumentan (Ruiz, Morales, & Ortiz, 2020) el contexto del proyecto se alinea con las políticas gubernamentales actuales enfocadas en la promoción de la industria 4.0 y el fortalecimiento de la manufactura local. El Plan Nacional de Desarrollo (PND) de Colombia enfatiza la importancia de integrar tecnologías avanzadas para mejorar la competitividad en sectores clave, como la agricultura y la manufactura (DNP, 2022). Al reducir la dependencia de maquinaria y componentes importados. Asimismo, el proyecto puede influir en la creación de nuevas políticas que incentiven la adopción de tecnologías avanzadas en PYMES, alineándose con el Programa de Transformación Productiva (PTP), que busca fomentar la competitividad industrial a través de la innovación tecnológica (PTP, 2021). Además, la producción local que propone el proyecto está en sintonía con los objetivos de sostenibilidad del gobierno, como parte de la transición hacia una economía circular, promoviendo la reducción de emisiones y la eficiencia en el uso de recursos (El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), en favor de la industria local de bienes de capital. Finalmente, según el National Competitiveness Council de Irlanda “a nivel social fomentaría la creación de empresas, la generación de conocimiento aplicado y de empleos calificados en áreas tecnológicas de alto valor agregado, ingredientes esenciales para el despegue industrial”. (National Competitiveness Council (Ireland), 2016). Según estimaciones basadas en casos de implementación de tecnologías CNC e impresión 3D en PYMES de manufactura, se prevé que el proyecto podría generar un incremento en

---

<sup>3</sup> Sofisticación industrial: se refiere al nivel de complejidad y avance tecnológico que ha alcanzado un país o región en su sector manufacturero. Se caracteriza por la capacidad de producir bienes y servicios de alto valor agregado, utilizando tecnologías avanzadas y procesos eficientes.

la productividad del 25% en las empresas participantes (Ministerio de Industria, Innovación y Turismo, 2020).

En cuanto a la creación de empleo, la implementación de este tipo de maquinaria podría generar un aumento del 10-15% en la contratación de personal técnico y especializado, con un impacto positivo directo en sectores como el diseño, la programación y la operación de tecnologías avanzadas (National Competitiveness Council (Ireland), 2016). A nivel nacional, este aumento podría traducirse en la creación de al menos 500 a 1000 nuevos empleos en los primeros dos años, considerando la expansión del sector agrícola y manufacturero.

La implementación del proyecto enfrenta varios riesgos y barreras potenciales, incluyendo desafíos regulatorios relacionados con las normativas de drones, resistencia al cambio tecnológico en las PYMES agrícolas, y la necesidad de infraestructura adicional para el montaje y mantenimiento de la máquina. También es posible que surjan problemas financieros debido a la inversión inicial necesaria y dificultades de adaptabilidad de la tecnología a diferentes procesos agrícolas. Para superar estos obstáculos, es crucial colaborar con autoridades regulatorias, proporcionar capacitación adecuada, considerar opciones de financiamiento y realizar pruebas piloto para garantizar la aceptación y efectividad de la máquina multifuncional. A pesar de estos desafíos, el proyecto tiene el potencial de generar un impacto positivo en la sociedad colombiana al fomentar la investigación y el desarrollo de soluciones innovadoras que aborden desafíos locales y promuevan el bienestar de la población. Además, contribuiría al fortalecimiento de la economía nacional y la generación de oportunidades de empleo en sectores de alta tecnología, impulsando así el desarrollo social y económico del país.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Desarrollar una máquina multifuncional que contenga impresión 3D, mecanizado de PCB y corte láser, para la fabricación de componentes de drones personalizados y reducción de costos en PYMES agrícolas en colombiana.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar el diseño mecánico, estructural y de sistemas de control del prototipo de máquina multifuncional de arquitectura tipo serie definiendo los materiales, dimensiones, motores, operaciones y funciones.
- Ensamblar el prototipo funcional de máquina multifuncional de 3 ejes con arquitectura en serie, siguiendo planos y especificaciones técnicas para un montaje preciso y una señalización de seguridad.
- Evaluar el desempeño en términos de precisión dimensional de los productos obtenidos, análisis de costos de fabricación y velocidad de operación del prototipo, para la fabricación de piezas de dron.

## **4. MARCO REFERENCIAL**

### **4.1. ESTADO DEL ARTE**

La evolución de la Industria 4.0 ha traído consigo una serie de tecnologías avanzadas que prometen transformar la producción en diversos sectores. En este contexto, el diseño de una máquina multifuncional destinada a la fabricación de componentes de drones representa una oportunidad significativa para aprovechar estas tecnologías y mejorar la eficiencia, precisión y sostenibilidad en la producción. Este documento detalla el diseño mecánico, estructural y de sistemas de control de la máquina, resaltando su aplicabilidad en el sector de los drones y cómo integra las tecnologías más innovadoras.

#### **4.1.1. REVISIÓN DE TECNOLOGÍAS RELEVANTES**

- **Tecnologías de la Industria 4.0 en la Agricultura y su Aplicación en la Fabricación de Drones:** el estudio de Bertoglio y Sehnem (2024) destaca la importancia de tecnologías como la impresión 3D, el corte láser y el mecanizado CNC en la agricultura, que también son cruciales para la fabricación de componentes de drones. Estas tecnologías no solo optimizan la producción, sino que también mejoran la sostenibilidad y la eficiencia operativa en entornos de producción en serie. La máquina multifuncional propuesta incorpora estas tecnologías para maximizar el rendimiento y adaptabilidad en la fabricación de piezas de alta precisión (Bertoglio & Sehnem, 2024).
- **Diseño de Sistemas de Impresión 3D Modular:** el diseño axiomático presentado por Porpíglío et al. (2023) demuestra cómo un cabezal de impresión 3D modular basado en extrusión de material puede ofrecer flexibilidad y adaptabilidad en diversas aplicaciones. Esta investigación es relevante para nuestro prototipo, ya que la capacidad de ajustar y

personalizar las herramientas de impresión 3D en la máquina multifuncional es fundamental para atender diferentes necesidades de producción de componentes de drones (Porpíglío, Scalice, & Silveira, 2019).

- **Precisión en el Control de Movimiento:** el estudio de Li et al. (2022) sobre sistemas de control de movimiento preciso subraya la importancia de combinar sensores y algoritmos para asegurar alta precisión y repetibilidad. Esta tecnología es incorporada en la máquina multifuncional para garantizar que las piezas sean fabricadas con exactitud y cumplan con los estándares de calidad requeridos en la industria de drones (Li, Chen, & & Yang, 2022).
- **Control Autónomo de Procesos para Prototipos:** Leng et al. (2022) exploran el control autónomo de procesos basado en la orquestación de borde de nube para la creación rápida de prototipos de PCB. Aunque enfocado en placas de circuito impreso, este enfoque proporciona valiosas perspectivas sobre cómo gestionar el control de procesos y personalizar la producción en masa, aspectos que se reflejan en la capacidad de la máquina multifuncional para adaptarse a diferentes tipos de componentes y configuraciones (Leng, y otros, 2022).
- **Interfaz de Usuario y Experiencia:** Ramírez-Acosta (2021) aborda la importancia de una interfaz de usuario intuitiva para facilitar el uso de máquinas multifuncionales. Este aspecto es crucial para nuestra máquina, ya que una interfaz amigable mejora la accesibilidad y eficiencia operativa, permitiendo a usuarios con diferentes niveles de experiencia operar la máquina de manera efectiva (Ramirez, Interfaz y experiencia de usuario: parámetros importantes para un diseño efectivo. Tecnología en Marcha, 2021).
- **Integración de Cortes Láser y Mecanizado CNC:** Kiesmüller et al. (2019) demuestran los beneficios de integrar sistemas de corte láser y mecanizado CNC en una sola máquina. Esta

investigación respalda la decisión de combinar estas tecnologías en nuestra máquina multifuncional, permitiendo la fabricación de piezas complejas y de alto rendimiento, esenciales para los drones (Kiesmüller, Salomon, & Voss, 2019).

- Aplicaciones de Impresión 3D y Mecanizado CNC en Drones: el trabajo de Nikolakis et al. (2017) explora el uso de impresión 3D y mecanizado CNC para fabricar drones agrícolas de bajo costo. Esta investigación confirma la viabilidad de utilizar estas tecnologías para producir componentes de drones, alineándose con los objetivos de nuestro diseño (Nikolakis, Bampoula, & Alexopoulos, 2023).

En este apartado se demuestra un creciente interés y avance en el desarrollo de máquinas multifuncionales que integran tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva, como la impresión 3D, el corte láser y el mecanizado CNC. Estas máquinas tienen el potencial de revolucionar diversos sectores, desde la agricultura hasta la manufactura de electrónica, al ofrecer mayor eficiencia, flexibilidad, precisión y sostenibilidad en los procesos de fabricación.

La evolución del estado del arte se evidencia en varios aspectos:

1. Diseño modular: Se han propuesto diseños modulares para componentes clave, como cabezales de impresión 3D, que permiten mayor adaptabilidad a diferentes necesidades de fabricación.
2. Sistemas de control avanzados: Se han desarrollado sistemas de control de movimiento precisos y algoritmos de control autónomos para mejorar el rendimiento, la precisión y la eficiencia de las máquinas multifuncionales.
3. Interfaces de usuario intuitivas: Se ha destacado la importancia de interfaces amigables para facilitar la adopción y uso de estas máquinas por parte de usuarios con diferentes niveles de experiencia.
4. Aplicaciones en diversos sectores: Las investigaciones han explorado la aplicación de estas

tecnologías en áreas como la agricultura (fabricación de drones agrícolas), la manufactura de electrónica (creación rápida de prototipos de PCB) y la producción de piezas complejas en general.

5. Enfoques de integración: Se ha demostrado la viabilidad y los beneficios de combinar tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva en un solo sistema híbrido<sup>4</sup>, sentando las bases para el desarrollo de máquinas multifuncionales más avanzadas.

A pesar de estos avances, también se identifican desafíos, como la necesidad de sistemas de control robustos e interfaces de usuario optimizadas para garantizar un rendimiento óptimo y facilitar la adopción generalizada de estas máquinas.

En general, el estado del arte refleja un campo en constante evolución, con un gran potencial para transformar la fabricación en múltiples industrias. Se espera que futuros desarrollos sigan mejorando la integración de tecnologías, la precisión, la eficiencia y la facilidad de uso de las máquinas multifuncionales.

---

<sup>4</sup> Sistema Híbrido: es aquel que combina dos o más componentes diferentes para lograr un objetivo común

## 4.2. MARCO HISTÓRICO

El desarrollo de máquinas multifuncionales ha seguido un curso evolutivo impulsado por avances tecnológicos en diversos campos como la manufactura aditiva, el control numérico por computadora (CNC), y la experiencia del usuario. A continuación, se presentan los hitos más importantes que han marcado esta evolución.

- ✓ 2024 → Optimización del Proceso de Depósito de Energía Dirigida por Láser mediante Aprendizaje Automático: en 2024, Kashaev y Wang propusieron un método innovador para mejorar la estabilidad y consistencia en el proceso de deposición de energía dirigida por láser. Su enfoque se centra en el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) para monitorear y ajustar los parámetros del proceso en tiempo real. Este avance, aunque aplicado inicialmente a la deposición de láser con alambre lateral, tiene potencial para ser implementado en otros procesos de fusión láser, incluyendo la fabricación aditiva y el revestimiento. Esta investigación marca un importante paso hacia la automatización inteligente de procesos industriales (Kashaev & Wang, 2024).
- ✓ 2022 → Rediseño de Máquinas CNC Láser: en 2022, Sánchez desarrolló un nuevo diseño para una máquina CNC láser, integrando las tecnologías de impresión 3D y corte láser. Este trabajo destacó la viabilidad de fusionar estos dos procesos en una sola máquina, proporcionando una mayor versatilidad en el mecanizado y la fabricación de prototipos. La capacidad de realizar tanto el corte láser como la impresión 3D en un mismo equipo representa una solución eficiente para diversos sectores industriales (Sánchez, 2022).
- ✓ 2021 → Diseño de una Interfaz de Usuario Intuitiva para Máquinas Multifuncionales: la importancia de la interfaz de usuario (UI) en las máquinas multifuncionales fue subrayada en el trabajo de Ramírez-Acosta en 2021. Este estudio puso de manifiesto que una interfaz intuitiva es

crucial para que usuarios con diferentes niveles de experiencia puedan operar estos equipos de manera efectiva. Además, la facilidad de uso es clave para fomentar la adopción de estas tecnologías en entornos industriales y educativos (Ramirez, Interfaz y experiencia de usuario: parámetros importantes para un diseño efectivo., 2021).

- ✓ 2020 → Mejoras en Precisión y Rendimiento de Máquinas Multifuncionales: el trabajo de Feng y Haring en 2020 se centró en la integración de sensores y algoritmos de control avanzado para mejorar la precisión y el rendimiento de máquinas multifuncionales. Estas innovaciones contribuyeron significativamente a la precisión del mecanizado y a la calidad de la superficie de los materiales trabajados, además de optimizar la eficiencia general del proceso (Feng & Haring, 2020).
- ✓ 2020 → Implementación de un Sistema CNC Intercambiable para Aplicaciones Didácticas: también en 2020, Valderrama presentó un sistema CNC multifuncional compatible con tecnologías de impresión 3D, corte y fresado de materiales blandos. Este desarrollo fue especialmente significativo en el ámbito educativo, permitiendo a los estudiantes y profesionales experimentar con múltiples procesos de fabricación en un solo equipo, facilitando la producción de prototipos y piezas funcionales (Valderrama, 2020).
- ✓ 2018 → Diseño de una Impresora 3D Core XY Multifuncional: Prado, Peralta Alemán y colaboradores, en 2018, abordaron el diseño e implementación de una impresora 3D de geometría Core XY con capacidades de impresión aditiva y láser. Este desarrollo se enmarcó en una estrategia de innovación tecnológica que buscaba ofrecer una solución versátil y eficiente para el desarrollo de prototipos y piezas en distintos sectores industriales (Prado, Peralta Alemán, Maraví, & Iparraguirre, 2018).
- ✓ 2017 → La Ciencia detrás del Diseño de la Experiencia del Usuario: en 2017, Junaid exploró cómo

se podían entrenar redes neuronales para optimizar el diseño de interfaces de usuario en máquinas multifuncionales. Su estudio demostró que el diseño efectivo de interfaces no solo facilita la interacción entre el usuario y la máquina, sino que también mejora la eficiencia operativa de estas herramientas tecnológicas (Junaid, 2017).

A lo largo de la historia se presenta una visión general de la evolución y el desarrollo de las máquinas multifuncionales que integran tecnologías de fabricación aditiva y sustractiva, como la impresión 3D, el corte láser y el mecanizado CNC. Investigaciones y avances significativos han resaltado el potencial de estas máquinas para transformar diversos sectores, como la agricultura, la manufactura de electrónica, la educación y la producción de piezas complejas

Uno de los aspectos más relevantes presentados es la aplicación de estas tecnologías en la agricultura, donde se han identificado beneficios potenciales en términos de eficiencia, productividad y sostenibilidad. Además, se han desarrollado interfaces de usuario intuitivas para facilitar el uso y la adopción de estas máquinas por parte de usuarios con diferentes niveles de experiencia.

Otro punto destacado es la integración de sensores y algoritmos de control para mejorar la precisión y el rendimiento de las máquinas multifuncionales, lo que ha llevado a mejoras significativas en la calidad del mecanizado y la eficiencia general. Asimismo, se han presentado diseños modulares para componentes clave, como cabezales de impresión 3D, que permiten una mayor flexibilidad y adaptabilidad a diferentes necesidades de fabricación.

Se resalta la importancia de estas tecnologías en el ámbito educativo, donde las máquinas multifuncionales se utilizan para la fabricación de prototipos y piezas funcionales, fomentando la innovación y el aprendizaje práctico. Además, se ha explorado la aplicación de estas máquinas en la manufactura de electrónica, lo que abre nuevas posibilidades para la creación rápida de prototipos y la producción de componentes electrónicos.

### 4.3. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de una máquina multifuncional implica el uso de tecnologías avanzadas y conceptos fundamentales dentro de la industria manufacturera. A continuación, se exponen los principales conceptos teóricos que sustentan el proyecto.

- **Automatización Industrial:** es un pilar fundamental en la industria moderna, ya que se refiere a la integración de sistemas y tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia, productividad y calidad en los procesos industriales. Implica el uso de máquinas, robots, sistemas de control y software para realizar tareas que tradicionalmente eran llevadas a cabo por humanos. Según Groover (2020), "la automatización industrial ha sido un factor clave en el aumento de la productividad y la competitividad en la fabricación" (Groover, 2020).
- **Competitividad Industrial:** otro concepto relevante es la competitividad industrial, que hace referencia a la capacidad de un sector manufacturero para producir bienes y servicios de manera eficiente e innovadora, logrando una ventaja competitiva en el mercado tanto nacional como internacional. Porter (1990) sostiene que "la competitividad industrial depende de factores como la productividad, innovación, calidad, costos y capacidad de adaptación a las demandas del mercado" (Porter M. , 1990). Este proyecto busca contribuir a la competitividad mediante la integración de nuevas tecnologías en la manufactura.
- **Código G:** es un lenguaje de programación utilizado en el control numérico computarizado (CNC), indispensable para el control del movimiento de las máquinas herramienta. Este código consta de comandos alfanuméricos que especifican las coordenadas, velocidades y funciones necesarias para ejecutar operaciones de mecanizado. Como menciona Smid (2003), "el Código G es el lenguaje estándar utilizado en la programación CNC para controlar el movimiento de las máquinas herramienta y realizar operaciones de mecanizado" (Smid, 2003).

- **Mecanizado CNC:** es un proceso clave en la industria manufacturera, en el cual se emplean máquinas controladas por computadora para dar forma a piezas a partir de materiales sólidos, como metales, plásticos o madera. Este proceso permite realizar operaciones de corte, fresado y taladrado con alta precisión y repetibilidad. Valentino y Goldenberg (2003) afirman que "el mecanizado CNC ha revolucionado la industria al permitir la producción de piezas complejas con tolerancias estrechas y un alto grado de repetibilidad" (Valentino & Goldenberg, 2003).
- **Mecanizado en Seco:** en el ámbito del mecanizado, existe el mecanizado en seco, que se diferencia por no utilizar fluidos de corte durante las operaciones, lo cual reduce el impacto ambiental y los costos operativos. Weinert et al. (2004) destacan que "el mecanizado en seco ofrece beneficios ambientales y de seguridad al eliminar el uso de fluidos de corte peligrosos, además de reducir los costos de operación" (Weinert, Inasaki, Sutherland, & Wakabayashi, 2004).
- **Tipos de arquitecturas en CNC:** Las máquinas CNC pueden adoptar diferentes arquitecturas, dependiendo de la disposición de sus ejes y de cómo se controlan sus movimientos. A continuación, se describen las arquitecturas más comunes utilizadas en la industria actual.

**Arquitectura Paralela:** En las máquinas con arquitectura paralela, múltiples actuadores trabajan simultáneamente sobre un mismo eje o punto de la pieza. Esta configuración permite movimientos más rápidos y precisos, lo que es especialmente útil en aplicaciones que requieren alta rigidez y precisión, pero en áreas de trabajo más limitadas. Estudios recientes señalan que las máquinas de arquitectura paralela ofrecen ventajas en términos de estabilidad y capacidad de carga en aplicaciones industriales avanzadas, como las plataformas Stewart y otros robots de cinemática paralela (Machinery, 2020).

**Arquitectura Serie:** En esta arquitectura, los ejes se mueven de manera independiente, lo que permite un área de trabajo más amplia, aunque los movimientos son generalmente

menos rápidos y precisos en comparación con la arquitectura paralela. Las máquinas de arquitectura serie siguen siendo populares en la manufactura debido a su flexibilidad y mayor facilidad para trabajar con piezas grandes. Esta configuración sigue siendo la más común en la industria, ya que permite una gran versatilidad para diferentes tipos de piezas y aplicaciones (Machinery, 2020).

**Arquitectura Híbrida:** Las máquinas CNC con arquitectura híbrida combinan los beneficios de las configuraciones paralela y serie, aprovechando la precisión y velocidad de la primera, junto con la mayor área de trabajo de la segunda. Estas máquinas han ganado relevancia en la industria, especialmente en la fabricación aditiva, donde las capacidades híbridas permiten combinar procesos de adición y sustracción de material con gran precisión. Esto se observa en aplicaciones como las impresoras 3D y las máquinas que integran deposición de materiales con fresado CNC (Assunção, Karunakaran, Bandari, Ding, & Wu, 2018).

- **Dependencia Tecnológica:** sigue siendo un desafío importante para el desarrollo económico y la competitividad de los países en desarrollo, especialmente en un contexto global en el que la innovación tecnológica se convierte en un motor clave para el crecimiento. El Technology and Innovation Report 2023 subraya que esta dependencia puede limitar la capacidad de los países para competir en el mercado global, ya que dependen de tecnologías extranjeras para su avance. Este informe sugiere que la adopción de tecnologías locales y el fortalecimiento de capacidades tecnológicas internas son esenciales para reducir esta dependencia y mejorar la competitividad a largo plazo (UNCTAD, 2023).

Este apartado describe los componentes esenciales que conforman el prototipo de la máquina multifuncional, proporcionando un marco teórico sobre su funcionamiento y relevancia en la fabricación

avanzada. Los elementos listados son fundamentales para garantizar la integración de tecnologías de impresión 3D y mecanizado CNC en un solo sistema.

- **Cabezal 3D para CNC:** combina las capacidades de impresión aditiva con mecanizado sustractivo, lo que permite realizar operaciones como corte, fresado y taladrado en una misma pieza. Este dispositivo es esencial en la multifuncionalidad del prototipo, ya que optimiza los procesos de fabricación integrados en un solo equipo (Tao, Bi, Zho, & Capra, Concept and practice of a hybrid manufacturing process combining additive manufacturing and removal machining., 2018).



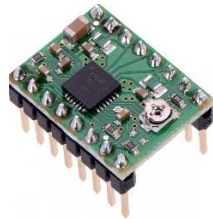
*Ilustración 1. Cabezal 3D para CNC y láser [Imagen]. (s.f.). Cults3D.*

- **Filamentos:** son utilizados en la impresora 3D son la materia prima para la creación de objetos tridimensionales. En este proyecto se utilizan filamentos PLA, un material común en la impresión 3D por su facilidad de uso y su biodegradabilidad, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso (ZuluPrints, 2018).



*Ilustración 2. Filamento PLA azul claro [Imagen]. (2021). ZuluPrints.*

- Driver Motor Paso a Paso A4988: este controlador se encarga de gestionar los motores bipolares, fundamentales para el movimiento preciso de las herramientas en el sistema CNC. Permite ajustar la corriente del motor, lo que influye en el torque y la temperatura, asegurando una operación eficiente y controlada del prototipo (Pololu Robotics & Electronics, s.f.).



*Ilustración 3. Controlador A4988 [Imagen]. (2016). Aranacorp.*

- Extrusor MK8: se encarga de fundir y extruir el filamento para depositarlo capa por capa, facilitando la impresión aditiva. Este componente es crucial para garantizar la precisión y calidad del material impreso en el proceso de fabricación (Mastoner, s.f.).



*Ilustración 4. Extrusor MK8 [Imagen]. (s.f.). Dualtronica.*

- Placa Shield RAMPS 1.4 y Controladores: es el cerebro del sistema, permitiendo controlar varios motores paso a paso y otros componentes, como el extrusor y la cama caliente. Es una parte integral del control de las operaciones de la impresora 3D y la máquina CNC (RepRap, s.f.).



*Ilustración 5. RAMPS 1.4 con 5 drivers A4988 [Imagen]. (s.f.). FlyRobo.*

- **Motor Nema 17:** este motor paso a paso es utilizado para el control de movimiento en el prototipo. Su alta precisión de posicionamiento es fundamental para las operaciones de impresión y mecanizado, lo que asegura la exactitud en los resultados finales (Lin Engineering, s.f.).



*Ilustración 6. Motor nema 17 [Imagen]. (s.f.). Lin Engineering.*

- **Cama de Calentamiento:** es vital para asegurar la adhesión de la primera capa del material impreso, evitando deformaciones y mejorando la calidad de las piezas fabricadas. Su control de temperatura es un factor crítico en el éxito de la impresión 3D (Ultimaker, s.f.).



*Ilustración 7. Cama calentada de aluminio [Imagen]. (s.f.). Amazon.*

- **Convertidor de Conmutación:** regula la energía suministrada a los distintos componentes del

prototipo, asegurando un funcionamiento estable y seguro. Este dispositivo es clave para el control de la energía eléctrica en el sistema, garantizando su operación eficiente (MercadoLibre, s.f.).



*Ilustración 8. Convertidor de conmutación LEDMO [Imagen]. (s.f.). Mercado Libre.*

#### 4.4. MARCO CONCEPTUAL

Para comprender la viabilidad y la innovación del proyecto, es crucial definir conceptos como la mecatrónica, los sistemas de control, los modelos CAD y el uso de drones en la agricultura. Estos elementos permiten integrar diferentes tecnologías en un solo entorno de fabricación, mejorando la eficiencia, flexibilidad y precisión en la producción industrial.

- ✓ **Máquina Multifuncional:** integra varias capacidades de fabricación en una sola plataforma, como la impresión 3D y el mecanizado CNC. Estas máquinas permiten la producción flexible de diversos componentes dentro de un solo entorno, aumentando la eficiencia y reduciendo costos. Según Tao et al. (2018), las máquinas multifuncionales representan una solución integral que combina diferentes tecnologías en una única plataforma (*Tao, Bi, Zho, & Capra, Concept and practice of a hybrid manufacturing process combining additive manufacturing and removal machining, 2018*).
- ✓ **Mecatrónica:** es una disciplina que combina mecánica, electrónica, control e informática para desarrollar productos y sistemas inteligentes. Esta sinergia permite crear sistemas automatizados más eficientes. Como señala Mahalik (2010), la mecatrónica implica un enfoque integrado en el diseño y fabricación de productos que requieren la interacción entre diferentes tecnologías (*Mahalik, 2010*).
- ✓ **La Mecatrónica en Máquinas Multifuncionales:** la integración de estas permite la automatización y coordinación de diversos procesos de fabricación. Esto aumenta la precisión, flexibilidad y eficiencia en la producción de piezas complejas. Tao et al. (2018) destacan el papel crucial que juega la mecatrónica al combinar mecánica, electrónica y control en un único sistema. (*Tao, Bi, Zho, & Capra, Concept and practice of a hybrid manufacturing*

*process combining additive manufacturing and removal machining, 2018).*

- ✓ Modelos CAD y Restricciones: son representaciones digitales tridimensionales que permiten definir características y limitaciones de un diseño. Estos modelos incluyen restricciones geométricas y de diseño que aseguran la integridad del objeto. Munkvold y Khayat (2021) explican que estas restricciones son esenciales para garantizar la funcionalidad y el éxito del diseño. (*Munkvold, 2021*).
- ✓ Sistemas de Control: son fundamentales en la automatización industrial, ya que permiten monitorear y regular procesos para garantizar que se mantengan dentro de los parámetros deseados. Bolton señala que estos sistemas combinan hardware y software para garantizar la calidad en la producción, ajustando las acciones de control según las variables de entrada (*Bolton, 2025*).
- ✓ Drones: un dron o vehículo aéreo no tripulado (UAV) es una aeronave controlada de forma remota o autónoma que se utiliza en aplicaciones diversas como la cartografía y la agricultura. Según Husnain et al. (2023), los drones se emplean en tareas como el monitoreo de cultivos y la detección temprana de plagas, representando una herramienta eficaz en la agricultura de precisión. (*Husnain, Mokhtar, Mohamed Shah, Dahari, & Iwahashi, 2023*).
- ✓ Agricultura: es la actividad humana dedicada a la producción de alimentos de origen vegetal. Galeano (2017) divide la agricultura en tipos como la de subsistencia, orientada a pequeñas comunidades, y la industrial, que produce grandes volúmenes de alimentos (*Galeano, 2017*).
- ✓ Drones en la Agricultura: el uso de drones en la agricultura ha mostrado ser una solución rentable para el monitoreo de cultivos, la evaluación de su estado y la detección de plagas. Huang et al. (2018) mencionan que los drones permiten un análisis a gran escala, haciendo

que la agricultura de precisión sea más eficiente y efectiva (*Huang, Humberto Jara, Montes, & Gomero, 2018*).

A continuación, se dará mayor enfoque a los tipos de arquitectura en máquinas CNC y la coalición de drones con resaltando un poco más de esta.

### **Tipos de Arquitectura en Máquinas CNC**

Las máquinas CNC (Control Numérico Computarizado) pueden tener diferentes arquitecturas según la disposición de sus ejes y la forma en que se controlan los movimientos. Las arquitecturas más comunes son:

**Arquitectura Paralela:** esta arquitectura se caracteriza por tener múltiples actuadores (motores) que actúan simultáneamente sobre un mismo eje o punto de la pieza de trabajo. Esto permite movimientos más rápidos y precisos, pero con un área de trabajo más limitada. "Las máquinas paralelas ofrecen una alta rigidez, precisión y capacidades dinámicas gracias a su arquitectura con múltiples actuadores que actúan en paralelo sobre un mismo punto operacional." (Serje & Pacheco, 2017).

**Arquitectura Serie:** en esta arquitectura, los ejes se mueven de forma independiente y secuencial, con un solo actuador por eje. Esto permite un área de trabajo más grande, pero con movimientos menos rápidos y precisos que la arquitectura paralela. "Las máquinas de arquitectura serie son las más comunes en el mercado, con cada eje controlado por un solo actuador en una configuración de cadena cinemática abierta<sup>5</sup>." (Chang, 2016).

**Arquitectura Híbrida:** esta arquitectura combina características de las arquitecturas paralela y serie, con algunos ejes en configuración paralela y otros en serie. Esto permite aprovechar las ventajas de ambos enfoques, como velocidad, precisión y área de trabajo. "La arquitectura híbrida es una estrategia de diseño

---

<sup>5</sup> Cinemática Abierta: se define como la combinación de varias articulaciones que trabajan juntas para producir un movimiento en el que el extremo distal (la parte más alejada del cuerpo) del segmento se mueve libremente en el espacio, sin estar en contacto con una superficie fija.

que combina elementos de diferentes estilos arquitectónicos para crear un nuevo y único espacio. Esta estrategia puede utilizarse para crear espacios que sean a la vez funcionales y estéticamente agradables, y que respondan a las necesidades específicas de los usuarios” (Montes C. , 2017).

Ilustración 9. Comparativa de las arquitecturas serie y paralela para máquinas CNC.

Característica	Arquitectura	
	Serial	Paralela
Cinemática	Simple. ★★★★★	Complejo, con presencia de singularidades en la región de trabajo. ★★☆☆☆
Capacidad dinámica	Limitada. ★★☆☆☆	Elevada (altas velocidades y aceleraciones). ★★★★★
Rigidez	Pobre (cadena abierta con elementos a flexión). ★★☆☆☆	Excelente (cadena cerrada con elementos a tracción o compresión) ★★★★★
Destreza	Excelente flexibilidad y capacidad de orientación. ★★★★★	Capacidad de orientación limitada. ★★☆☆☆
Control	Simple. ★★★★★	Complejo. ★★☆☆☆
Relación ET/VM*	Excelente. ★★★★★	Mala o buena según diseño. ★★☆☆☆
Topología del ET	Excelente (geometría regular). ★★★★★	Compleja (restringible a geometrias regulares). ★★☆☆☆
Modularidad	Buena. ★★☆☆☆	Excelente. ★★★★★

Fuente. "Tabla 1. Comparativo entre arquitecturas seriales y paralelas" de Serje, D. y Pacheco, A. (2017). *Cinemática paralela en la máquina-herramienta: Investigación, desarrollo y tendencias futuras*. DYNA, 84(201), p. 5. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.59572>

Esta imagen compara las características clave de las arquitecturas serie y paralela en máquinas CNC. Procede del artículo "Nuevo concepto de máquina tridimensional prototipo de bajo costo" publicado en la Revista Ingenierías Universidad de Medellín en 2017. De acuerdo con la comparación mostrada, las principales conclusiones son:

- La arquitectura serie tiene una cinemática más simple, pero una capacidad volumétrica limitada y

menor rigidez que la paralela.

- La arquitectura paralela, aunque más compleja, ofrece mayores velocidades y aceleraciones, excelente rigidez y buena capacidad de orientación, a costa de un área de trabajo más reducida.
- El control en la arquitectura serie es más simple, mientras que en la paralela es más complejo debido a la presencia de múltiples actuadores sincronizados.
- La relación entre Exactitud-Tiempo-Volumen de trabajo (ETV) es excelente para la arquitectura serie, pero puede ser mala o buena dependiendo del diseño en la arquitectura paralela.
- La topología de los elementos terminales es más regular y modular en la arquitectura serie, comparada con la geometría más compleja requerida en la paralela.
- En cuanto a modularidad, la arquitectura paralela tiene un excelente potencial, mientras que la serie es buena.

En resumen, esta comparativa resalta las ventajas y desventajas de cada enfoque arquitectónico, permitiendo evaluar cuál se adapta mejor a los requerimientos específicos de una aplicación CNC dada.

## **Drones y Agricultura**

Los drones, también conocidos como vehículos aéreos no tripulados (UAV), son aeronaves sin tripulación que "pueden ser controladas de forma remota o volar de manera autónoma" (Reg, 2010). Estos dispositivos han encontrado aplicaciones en diversas áreas, como la fotografía, la vigilancia, la agricultura y la entrega de mercancías. Según (Justin, 2004) un drone es "una aeronave sin piloto a bordo y reutilizable, capaz de mantener el vuelo autónomo, controlada por un operador remoto o mediante un plan de vuelo preinstalado" (p. 870). Los drones pueden ser propulsados por motores eléctricos o de combustión, y su tamaño y capacidades varían desde pequeños cuadricópteros<sup>6</sup> hasta grandes vehículos

---

<sup>6</sup> Cuadricópteros: es un tipo de multicoptero que se levanta y propulsa mediante cuatro rotores. Los cuatro rotores suelen estar colocados en los extremos de una cruz.

militares (Kimon, 2007).

Los drones han encontrado aplicaciones prometedoras en el sector agrícola, permitiendo una gestión más eficiente y sostenible de los cultivos. Según (Zhang & Kovacs, 2012) "los vehículos aéreos no tripulados (UAV) ofrecen una plataforma económica y flexible para adquirir información espacial y temporal de alta resolución sobre el estado de los cultivos" (p. 693). Los drones agrícolas pueden equiparse con cámaras multiespectrales, sensores térmicos y otros dispositivos para realizar tareas como el monitoreo de cultivos, la detección de plagas y enfermedades, la evaluación de estrés hídrico y la aplicación precisa de insumos (Huang, Thomson, Hoffman, Lan, & Fritz, 2013). Además, los UAV permiten una agricultura de precisión al proporcionar datos oportunos y precisos sobre las condiciones del campo, lo que conduce a un uso más eficiente de los recursos y a un mayor rendimiento de los cultivos.

*Ilustración 10. Uso de un dron para monitorización de terrenos agrícolas.*



*Fuente. Depositphotos. (s.f.). Drone agriculture: uso de drones en varios campos: investigación, análisis, seguridad, rescate [Fotografía]. Recuperado de <https://depositphotos.com/es/photo/drone-agriculture-drone-use-various-fields-research-analysis-safety-rescue-209692176.html>*

#### 4.5. MARCO LEGAL

El diseño y desarrollo de la máquina multifuncional está respaldado por un marco legal robusto que abarca desde normas constitucionales hasta estándares técnicos. Este marco legal garantiza que el proyecto cumpla con las disposiciones nacionales e internacionales, tanto en términos de derechos de propiedad como en seguridad y promoción de la innovación tecnológica.

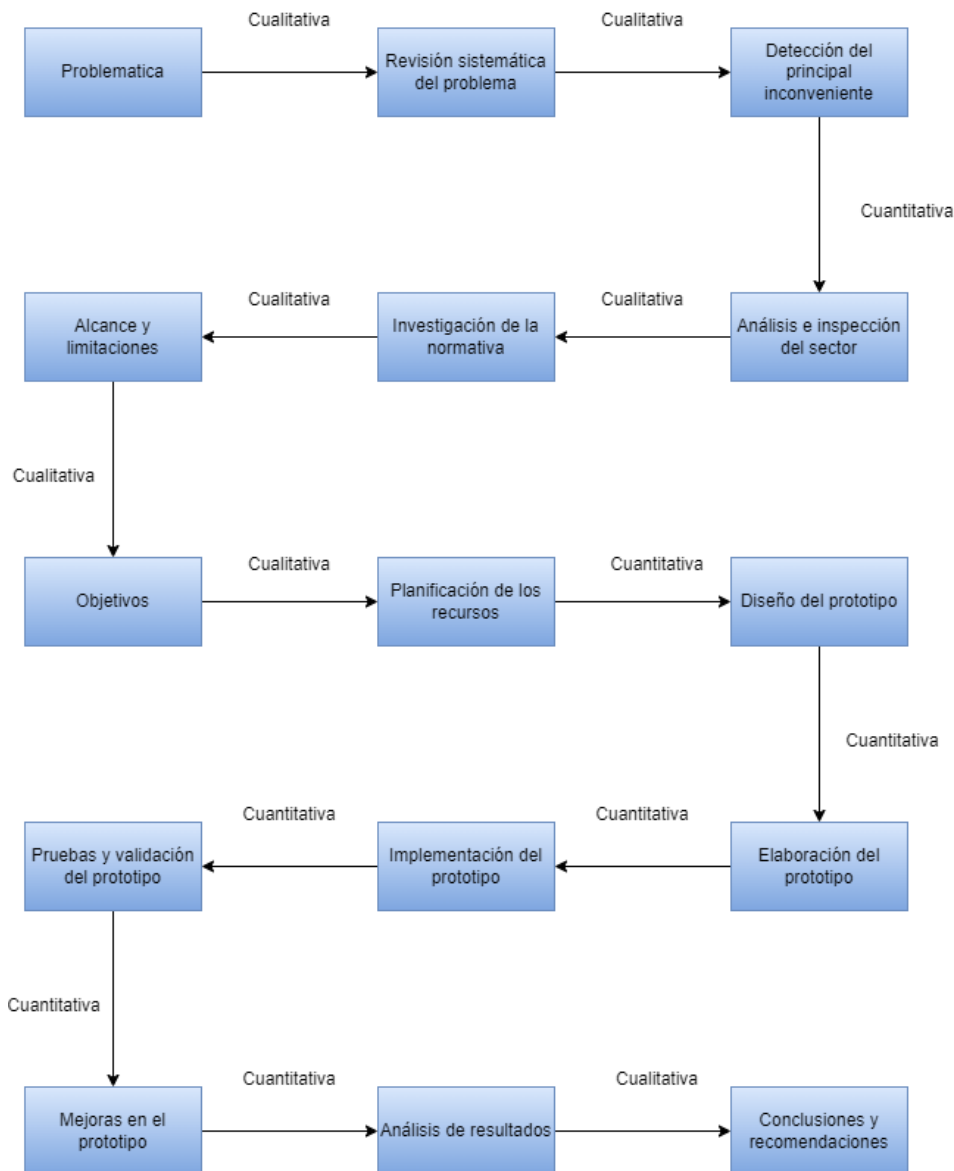
- Constitución Política de Colombia (1991): la Constitución Política de Colombia, en su artículo 333, consagra la libertad económica y la iniciativa privada, destacando que estas están limitadas por el bien común. Además, el artículo 334 establece que el Estado intervendrá para promover el empleo pleno de los recursos y asegurar una distribución equitativa de oportunidades. Estos preceptos apoyan el desarrollo de proyectos empresariales e innovadores, como lo es el prototipo de máquina multifuncional, al fomentar el emprendimiento y la creación de tecnología propia que contribuya al desarrollo económico del país (Constitución Política de Colombia, 1991).
- Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina (2000): este régimen regula los derechos de propiedad industrial, incluyendo patentes de invención, modelos de utilidad y diseños industriales. El prototipo de la máquina multifuncional podría acogerse a esta legislación en caso de que se considere solicitar una patente o registro de modelo de utilidad, protegiendo así los derechos de propiedad intelectual del equipo y asegurando su exclusividad en el mercado (Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina, 2000).
- Ley 1014 de 2006: Fomento a la Cultura del Emprendimiento, establece un marco normativo para promover el espíritu emprendedor en todos los niveles educativos del país, impulsando el desarrollo de proyectos innovadores que fomenten la creación de nuevas empresas y tecnologías. Este respaldo es esencial para el desarrollo del presente proyecto, ya que fomenta el emprendimiento basado en tecnologías avanzadas como la impresión 3D y el corte CNC integrados

en la máquina multifuncional (Ley 1014 de 2006).

- Ley 1286 de 2009: Fortalecimiento del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, esta ley busca fortalecer el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, y transforma a Colciencias en un Departamento Administrativo con mayor alcance. En el contexto del proyecto, esta norma respalda iniciativas de investigación y desarrollo tecnológico, proporcionando un entorno favorable para la creación de tecnologías emergentes como la máquina multifuncional (Ley 1286 de 2009).
- Documento CONPES 3866 de 2016: Política Nacional de Desarrollo Productivo: el Documento CONPES 3866 establece lineamientos para mejorar la productividad y competitividad de la industria manufacturera en Colombia. Este marco político es clave para el proyecto, ya que fomenta la creación de tecnologías innovadoras, como la máquina multifuncional, que pueden contribuir significativamente al desarrollo productivo del país (Documento Conpes 3866 de 2016).
- Ley 2069 de 2020: Impulso a la Tecnología de Impresión 3D, regula el uso de la tecnología de impresión 3D en Colombia, promoviendo su fomento y desarrollo. En el contexto del prototipo de la máquina multifuncional, que incluye capacidades de impresión 3D, esta norma proporciona el marco legal necesario para el uso y desarrollo de esta tecnología en el país (Ley 2069 de 2020).
- NTC 4109: Máquinas Herramienta. Seguridad. Requisitos Generales (1997): establece los requisitos generales de seguridad para el diseño y fabricación de máquinas herramienta, cubriendo aspectos como la protección contra riesgos mecánicos, eléctricos, térmicos, entre otros. En el desarrollo del prototipo de la máquina multifuncional, se deben tener en cuenta estos requisitos para garantizar la seguridad de los usuarios y operadores del equipo (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación).

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

Ilustración 11. Diagrama de flujo del diseño metodológico.



Fuente. Autores.

El desarrollo del proyecto sigue una metodología clara y estructurada, como se describe en el diagrama. Se inicia con la identificación del problema, seguido de una revisión cualitativa y análisis normativo, lo que permite establecer los objetivos y planificar recursos. Este enfoque conecta directamente con los aspectos técnicos del diseño de la máquina, donde se evalúan los requisitos de resistencia y

selección de materiales. Estos análisis incluyen la evaluación del módulo de elasticidad asegurar la integridad estructural. Se continúa con el diseño detallado, modelado cinemático y análisis térmico, utilizando herramientas CAD para validar el diseño y ajustar las dimensiones de los elementos mecánicos. Esta combinación de análisis metodológico y técnico garantiza la viabilidad y éxito del prototipo en las pruebas finales.

- **Requisitos de Resistencia y Selección de Materiales:** se evaluarán las cargas y fuerzas que enfrentará la máquina, seleccionando materiales adecuados en función de su resistencia, durabilidad y capacidad para soportar las condiciones operativas. Además, se realizará un análisis de esfuerzo y deformación de los materiales, lo que permitirá identificar puntos críticos de fallo y asegurar que los componentes cumplan con los requisitos de resistencia. Estos análisis preliminares ayudarán a ajustar las dimensiones de las piezas para optimizar el rendimiento estructural y minimizar posibles fallos durante el funcionamiento.
- **Diseño Detallado y Análisis de Esfuerzos:** se lleva a cabo un análisis detallado de los componentes, considerando los esfuerzos y las deformaciones que experimentarán. Se modelan y simulan los elementos estructurales usando software CAD para verificar la integridad mecánica.
- **Cinemática Directa:** se determinan los movimientos principales y los grados de libertad de la máquina, se modelan las trayectorias y movimientos de las partes móviles para optimizar la eficiencia del diseño y garantizar un funcionamiento fluido.
- **Software de Diseño CAD:** se utilizan herramientas CAD para el diseño preliminar y las simulaciones. En esta etapa se verifica la compatibilidad de los componentes y se ajustan detalles para garantizar que las partes encajen y funcionen correctamente.
- **Consideraciones de diseño final:** se definen las dimensiones finales de los componentes en función de los análisis anteriores con ayuda del diseño.

## 5.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

### Estructura mecánica

- ✓ Estructura rígida capaz de soportar las tres herramientas (impresión 3D, corte láser y mecanizado PCB), garantizando movimientos fluidos en los tres ejes cartesianos, sin desgaste innecesario, ruido o movimientos forzados.
- ✓ Capacidad para trabajar con piezas en una bancada de 330 mm x 360 mm x 140 mm para las tres herramientas.
- ✓ 3 grados de libertad para desarrollar las tres operaciones, anteriormente mencionados.
- ✓ Análisis cinemático para entender mejor la eficiencia de movimientos.
- ✓ Arquitectura en serie, que permite la modularidad de la estructura y flexibilidad en los tres ejes cartesianos para facilitar el cambio de herramienta.
- ✓ Accionamiento mediante motores paso a paso, con controladores dedicados en los ejes X, Y y Z.
- ✓ Tipo de unión de tornillo indirectas, que facilitan el ensamble y desensamble.

### Sistema de control

- ✓ Controlador principal integrado con sistemas dedicados para cada una de las funciones: impresión 3D, corte láser y mecanizado PCB, utilizando un Arduino con RAM para el control de los drivers, entradas y salidas.
- ✓ Sistema de seguridad que incluye un botón de paro de emergencia con desenclavamiento por llave, que interrumpe inmediatamente el suministro eléctrico para garantizar la protección del operario, las personas cercanas y el correcto funcionamiento de la máquina.
- ✓ Compatibilidad eléctrica basada en el cumplimiento de la normativa de colores para cableado y medidas de seguridad.

- ✓ Software compatible con plataformas de código abierto para facilitar la interacción y el control de las operaciones que permita automatizar la mayor cantidad de tareas posibles.

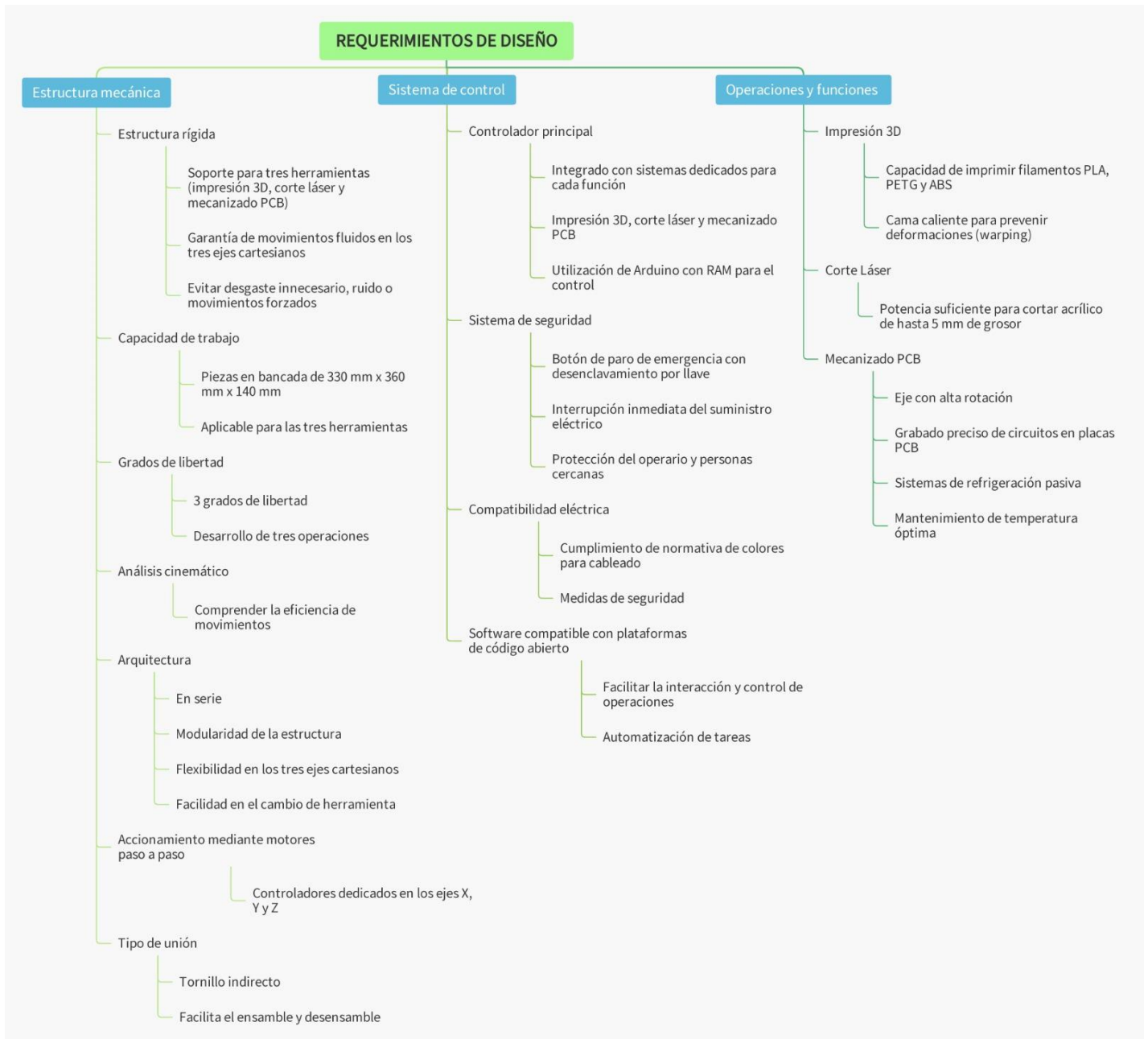
### **Operaciones y funciones**

- ✓ Impresión 3D: Capacidad para imprimir filamentos PLA, PETG y ABS, con cama caliente para prevenir deformaciones (warping) durante la impresión.
- ✓ Corte Láser: Potencia suficiente para cortar acrílico de hasta 5 mm de grosor.
- ✓ Mecanizado PCB: Eje con alta rotación, adecuado para el grabado preciso de circuitos en placas PCB, con sistemas de refrigeración pasiva para mantener una temperatura óptima.

Los requerimientos de diseño expuestos se orientan a asegurar que la máquina CNC multifuncional cumpla con los estándares necesarios de rigidez estructural, precisión operativa y flexibilidad para soportar las tres herramientas principales: impresión 3D, corte láser y mecanizado de PCB. La selección de los componentes se ha realizado con el fin de optimizar la eficiencia de los movimientos en los ejes cartesianos. La integración de motores paso a paso con sus respectivos controladores asegura un control robusto y fluido, mientras que la estructura modular facilita tanto el mantenimiento como el intercambio de herramientas según los requerimientos operacionales.

La compatibilidad con plataformas de código abierto permite una mayor flexibilidad en la programación y control de las operaciones. A su vez, se han implementado medidas de seguridad rigurosas, tales como un botón de paro de emergencia, que garantiza la integridad del operario, del entorno de trabajo y de la propia máquina.

Ilustración 12. Requerimientos de diseño



Fuente. Autores.

## 6. DESARROLLO INGENIERIL

### 6.1. MATERIALES

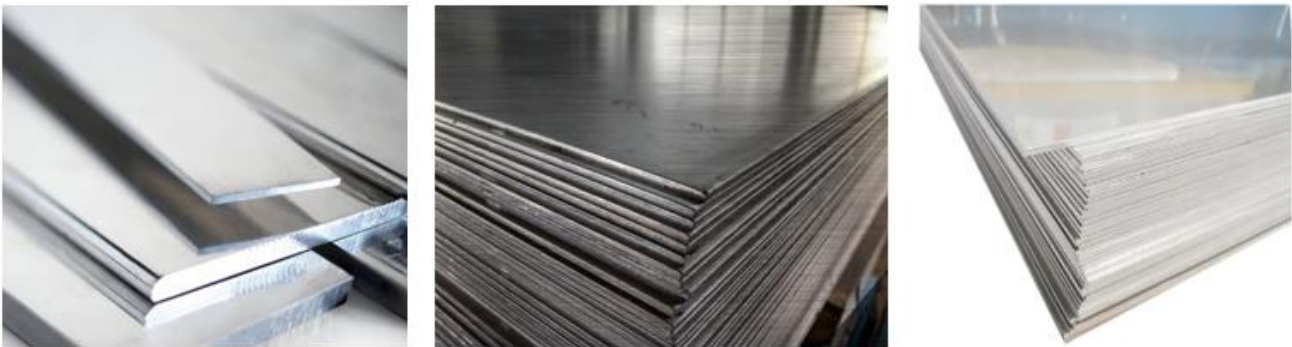
Tabla 1. Comparativa de materiales

Características	Aluminio	Dura-aluminio	Acero ASTM A36
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.7	2.8	7.85
<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	90-180	400-530	400-550
<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	69	72	200
<b>Límite elástico</b>	Alrededor de 35-70 MPa	Aproximadamente 200-400 MPa (dependiendo de la aleación exacta y el tratamiento térmico).	Alrededor de 250 MPa
<b>Limite Plástico</b>	Alrededor de 90-200 MPa.	Alrededor de 400-550 MPa.	Alrededor de 400 MPa
<b>Costo relativo por kg</b>	Moderado	Alto	Bajo
<b>Relación resistencia/costo</b>	Baja	Moderada	Alta
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Excelente	Muy buena	Baja
<b>Maquinabilidad</b>	Excelente	Buena	Moderada
<b>Soldabilidad</b>	Buena	Moderada	Excelente

<b>Peso</b>	Ligero	Ligero	Pesado
<b>Desventajas frente a los demás</b>	Menor resistencia mecánica. Más caro que el acero para igual resistencia. Menor rigidez.	Costo más elevado. Menor disponibilidad. Más difícil de soldar que el aluminio común.	Pesado. Menor resistencia a la corrosión. Requiere más energía para mecanizar.
<b>Ventajas clave</b>	Muy ligero. Excelente resistencia a la corrosión. Fácil de mecanizar.	Combina ligereza con alta resistencia. Buena resistencia a la fatiga. Mejor resistencia que el aluminio común.	Mejor relación resistencia/costo. Ampliamente disponible. Fácil de soldar.

*Fuente. Autores.*

*Ilustración 13. Aluminio, dura aluminio y acero astm a36*



*Fuente. Autores.*

Esta tabla comparativa muestra claramente que el acero ASTM A36 ofrece la mejor relación resistencia/costo entre los tres materiales. Algunas observaciones adicionales:

- Resistencia y costo: El acero ASTM A36 proporciona una resistencia a la tracción similar al dura-aluminio (400-550 MPa vs 400-530 MPa), pero a un costo significativamente menor por kilogramo.
- Peso: La principal desventaja del acero ASTM A36 es su peso, siendo casi 3 veces más pesado que el aluminio y el dura-aluminio (densidad de 7.85 g/cm<sup>3</sup> vs 2.7-2.8 g/cm<sup>3</sup>).
- Disponibilidad: El acero ASTM A36 es ampliamente disponible, lo que facilita su adquisición en comparación con los otros materiales.
- Corrosión: Aunque el acero ASTM A36 es más susceptible a la corrosión que los otros dos materiales, existen diferentes estrategias para protegerlo. En este caso, se aplicó una capa de pintura 3 en 1 en aerosol, lo que mejora significativamente su resistencia a la corrosión.
- Aplicaciones: La elección del material dependerá en gran medida de la aplicación específica. Por ejemplo:

Para estructuras donde el peso es crítico, el aluminio o dura-aluminio podrían ser preferibles. Para aplicaciones donde la resistencia y el bajo costo son prioritarios, y el peso no es un factor crítico, el acero ASTM A36 sería la mejor opción.

Procesamiento: El acero ASTM A36 es excelente para soldadura (soldabilidad: excelente), lo que puede ser una ventaja significativa en ciertos procesos de fabricación.

### 6.1.1. MÓDULO ELASTICIDAD Y LÍMITE ELÁSTICO

Tabla 2. Comparación del módulo de elasticidad y límite elástico

Características	Aluminio	Dura-aluminio	Acero ASTM A36
<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	69	72	200
<b>Límite elástico</b>	Aprox. 35-70 MPa	Aprox. 200-400 MPa	Aprox. de 250 MPa

Fuente. Autores.

A continuación, se presenta un análisis comparativo del módulo de elasticidad y el límite elástico de los materiales: aluminio, duraluminio y acero ASTM A36. Estos parámetros son fundamentales para entender el comportamiento de los materiales bajo carga, específicamente en cuanto a su rigidez y capacidad de deformarse elásticamente antes de entrar en deformación plástica.

#### 1) Aluminio (Aluminio puro 99%)

Módulo de Elasticidad (E): Aproximadamente 69 GPa.

Análisis: El módulo de elasticidad del aluminio es relativamente bajo en comparación con otros metales, lo que indica que es un material menos rígido. En aplicaciones estructurales, esto implica que el aluminio se deformará más bajo la misma carga en comparación con materiales de mayor módulo de elasticidad, como el acero.

Límite Elástico: Aproximadamente 35-70 MPa.

Análisis: El límite elástico del aluminio es bajo en comparación con otros metales industriales. Esto significa que el aluminio puede sufrir deformación plástica con cargas relativamente bajas, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requieren materiales livianos, pero donde la resistencia a la deformación no es un factor crítico.

## 2) Duraluminio (Aleación de Aluminio y Cobre, Al-Cu)

Módulo de Elasticidad (E): Aproximadamente 70-80 GPa.

Análisis: El duraluminio tiene un módulo de elasticidad ligeramente mayor que el aluminio puro, lo que lo hace más rígido y menos propenso a la deformación elástica. Esto lo convierte en una opción preferida en aplicaciones aeroespaciales y automotrices donde se busca mayor resistencia a la deformación bajo carga sin un aumento considerable de peso.

Límite Elástico: Aproximadamente 200-400 MPa.

Análisis: El límite elástico del duraluminio es considerablemente superior al del aluminio puro, lo que le permite soportar cargas más elevadas antes de experimentar deformación plástica. Esto lo convierte en un material excelente para componentes que requieren alta resistencia en combinación con ligereza.

## 3) Acero ASTM A36

Módulo de Elasticidad (E): Aproximadamente 200 GPa.

Análisis: El acero ASTM A36 es significativamente más rígido que el aluminio y el duraluminio, gracias a su alto módulo de elasticidad. Esto significa que, bajo cargas comparables, el acero A36 se deforma mucho menos que el aluminio o el duraluminio. Es por ello que el acero se utiliza extensamente en estructuras donde la rigidez y resistencia son primordiales, como puentes y edificios.

Límite Elástico: Aproximadamente 250 MPa.

Análisis: El límite elástico del acero ASTM A36 es notablemente más alto que el del aluminio, pero inferior al de algunas aleaciones de duraluminio. Sin embargo, el acero ASTM A36 ofrece una excelente combinación de resistencia, ductilidad y capacidad de soportar deformaciones antes de fallar, lo que lo hace muy versátil para aplicaciones estructurales pesadas.

### 6.1.2. ACERO ASTM A36

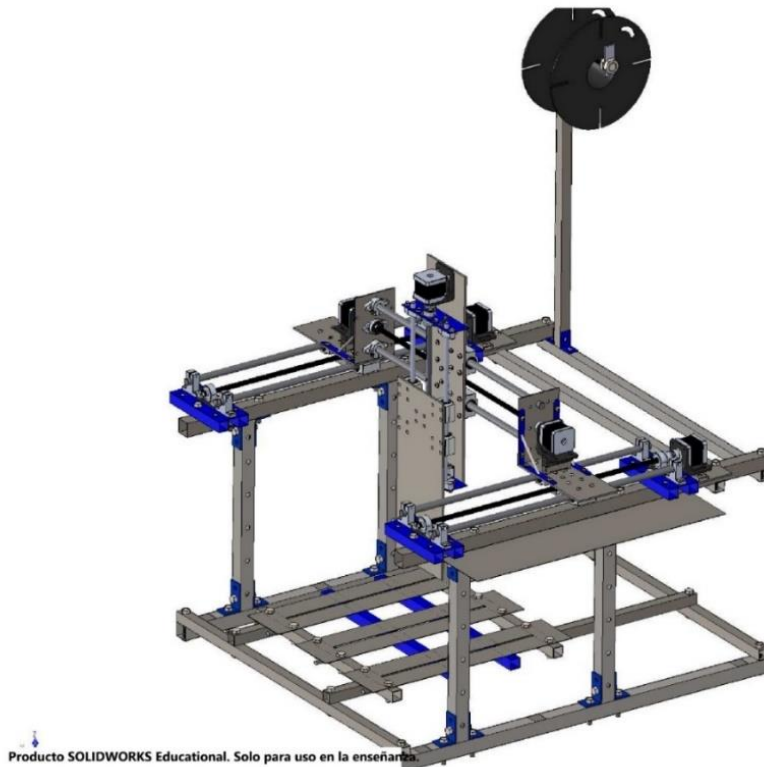
El acero ASTM A36 sigue siendo uno de los aceros estructurales más utilizados en la industria de la construcción. Este acero al carbono se caracteriza por su excelente soldabilidad y buena resistencia mecánica, con un límite de fluencia mínimo de 250 MPa (36 ksi) y una resistencia a la tracción entre 400-550 MPa (58-80 ksi) (Astm Internacional, 2019). Sus principales ventajas incluyen su alta disponibilidad, bajo costo y facilidad de fabricación. Se utiliza ampliamente en la construcción de edificios, puentes, torres de transmisión y estructuras industriales debido a su versatilidad y confiabilidad (American Institute of Steel Construction, 2022). El acero A36 también se emplea en la fabricación de piezas mecánicas, carrocerías de vehículos y en la industria naval. Su composición química, que incluye un máximo de 0.26% de carbono, 0.75% de manganeso y 0.40% de silicio, contribuye a su buena ductilidad y maleabilidad, facilitando los procesos de conformado y mecanizado (ASM International, 2021).

Además de sus características mecánicas, el acero ASTM A36 destaca por su comportamiento en condiciones ambientales variadas. Presenta una buena resistencia a la corrosión atmosférica, aunque en ambientes agresivos puede requerir tratamientos superficiales o recubrimientos protectores (Zhang C. D., 2020). En términos de sostenibilidad, el acero A36 es completamente reciclable, lo que contribuye a reducir su impacto ambiental a largo plazo (World Steel Association, 2022). Su comportamiento ante cargas dinámicas y fatiga es adecuado para muchas aplicaciones, aunque para estructuras sometidas a cargas cíclicas intensas se pueden preferir aceros de mayor resistencia (Nip, 2021). En el contexto de la construcción moderna, el acero A36 se está utilizando cada vez más en combinación con otros materiales en estructuras híbridas, aprovechando sus propiedades en sinergia con materiales como el hormigón o la madera para crear soluciones estructurales más eficientes y sostenibles (American Society of Civil Engineers, 2023).

## 6.2. DISEÑO MECANICO

En esta fase se realizaron los modelos CAD correspondientes a la estructura de la máquina multifuncional por medio del software SolidWorks, la cual cuenta con unas dimensiones de 740mm de largo, 660 mm de ancho y 1050mm de alto. La estructura es en acero ASTM A36 y dispone de 2 varillas en acero plata con un diámetro de 12mm para soportar los pilares laterales producidos en acero ASTM A653 Type B G60 con un espesor de 3mm ubicado en el eje Z y 1 varilla roscada de aluminio mecanizado de 8mm, entre estas, y otras 4 varillas de la mismas dimensiones y consideraciones para el eje X, 2 a cada costado, lo que asegura una distribución equilibrada de las fuerzas de torsión y tracción, permitiendo un desplazamiento suave y preciso, de igual manera se hace uso en cada lado de una varilla roscada, en la estructura se encuentra ubicada la bancada, los soportes laterales, los actuadores que se encargan del movimiento en los ejes X, Y y Z, entre otros componentes para su funcionalidad.

*Ilustración 14. Diseño CAD mecánico*

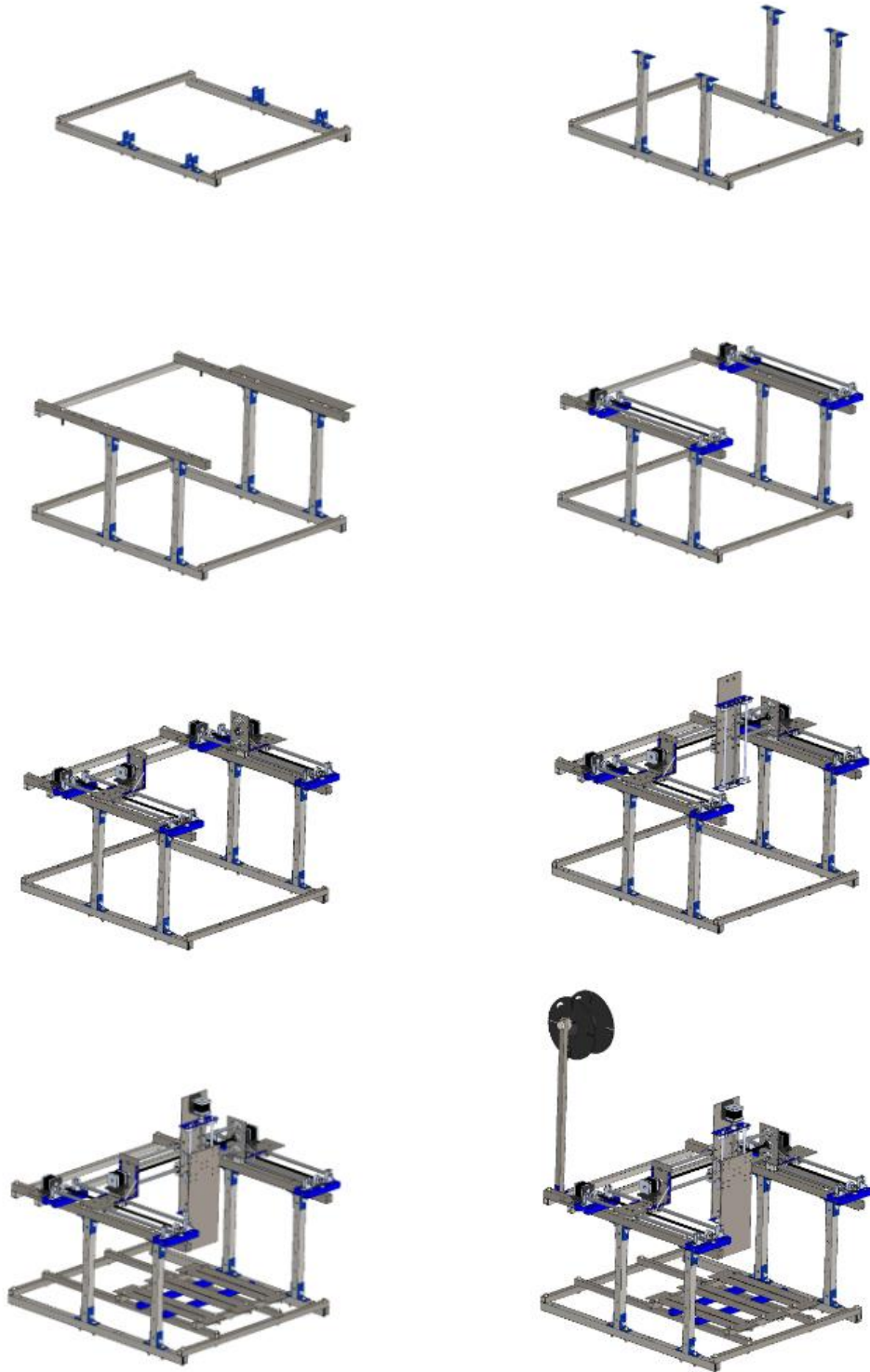


*Fuente. Autores.*

El diseño mecánico de la máquina, que combina capacidades de impresión 3D, corte láser y mecanizado de placas de circuito impreso (PCB), se ha desarrollado en varias fases, asegurando una implementación efectiva de los movimientos en los tres ejes. A continuación, se describen las etapas del diseño:

- 1) Estructura base: se ensambla una base rectangular de acero ASTM A36, proporcionando el soporte y la estabilidad necesarios para las etapas posteriores.
- 2) Adición de columnas verticales: se instalan columnas de acero ASTM A36 que soportan el sistema de desplazamiento en el eje Z, asegurando rigidez y estabilidad.
- 3) Montaje de soportes del eje X: se integran perfiles horizontales en la parte superior de las columnas para permitir un desplazamiento fluido a lo largo del eje X.
- 4) Instalación de actuadores y componentes del eje X: se colocan motores paso a paso en los extremos laterales, junto con las varillas de transmisión necesarias para el movimiento longitudinal.
- 5) Implementación del sistema del eje Z: se integran guías y actuadores para controlar los desplazamientos verticales, ajustando la altura de trabajo según el proceso requerido.
- 6) Integración del eje Y: se instalan componentes que permiten el movimiento lateral del cabezal, asegurando precisión en los desplazamientos.
- 7) Incorporación de la mesa de trabajo posterior: se introduce una mesa que sirve como soporte para el material durante los procesos de fabricación, proporcionando una base estable.
- 8) Sistema de alimentación de filamento: se completa el diseño con un sistema de alimentación de filamento para la impresión 3D, ubicado en un lateral de la estructura.

*Ilustración 15. Etapas del diseño mecánico*

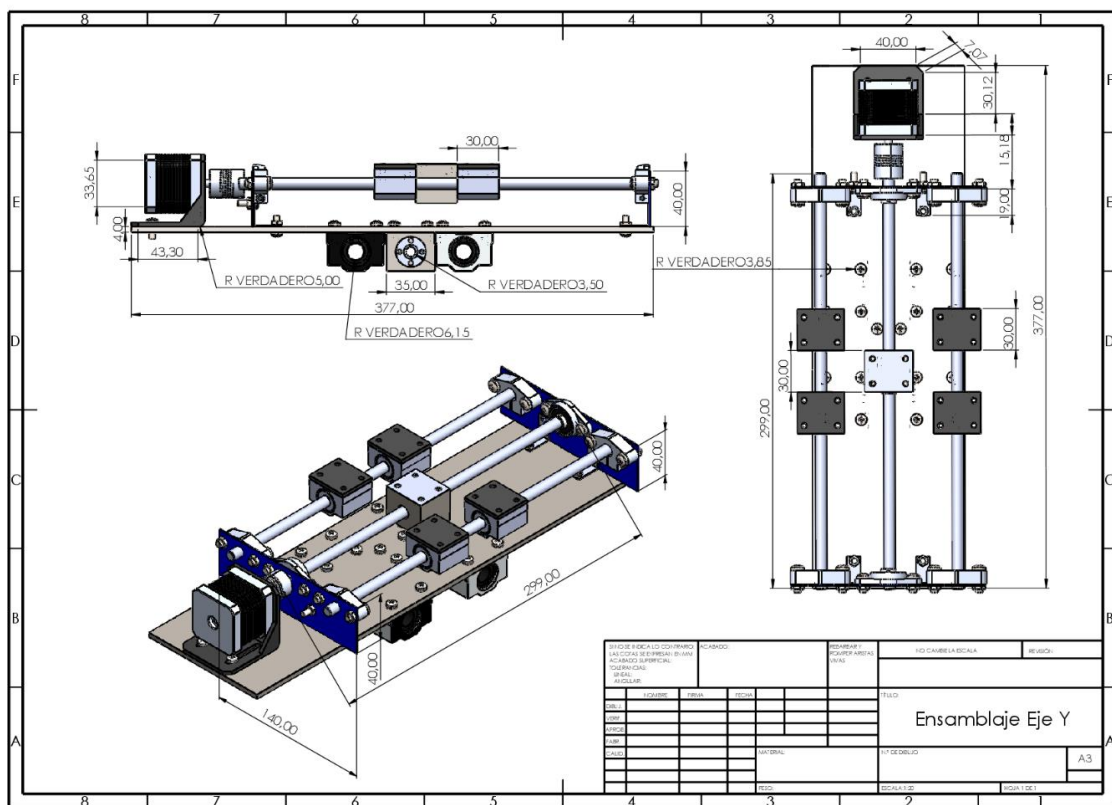


*Fuente. Autores.*



de los extremos, cuya carcasa mide 65.00 mm de ancho por 98.00 mm de largo, con una separación entre los tornillos de fijación de 45.30 mm. Este motor está acoplado a varilla roscada, que se extiende a lo largo de los 500.00 mm de longitud total del sistema, proporcionando el movimiento necesario para el desplazamiento sobre el eje X. La estructura principal, construida a partir de perfiles lineales, está soportada por dos bloques de fijación azules en cada extremo, los cuales tienen dimensiones de 60.00 mm de largo y 54.00 mm de ancho, con una altura de 42.00 mm. Estos bloques actúan como soportes de los rodamientos que permiten el desplazamiento fluido del sistema. El diámetro de las guías lineales es de 10.00 mm, garantizando la estabilidad y precisión del movimiento. La correcta disposición de los componentes y la precisión en las cotas de fabricación son esenciales para asegurar el funcionamiento óptimo del eje X, especialmente en aplicaciones donde se requiere alta precisión, como en la impresión 3D y el mecanizado de circuitos impresos.

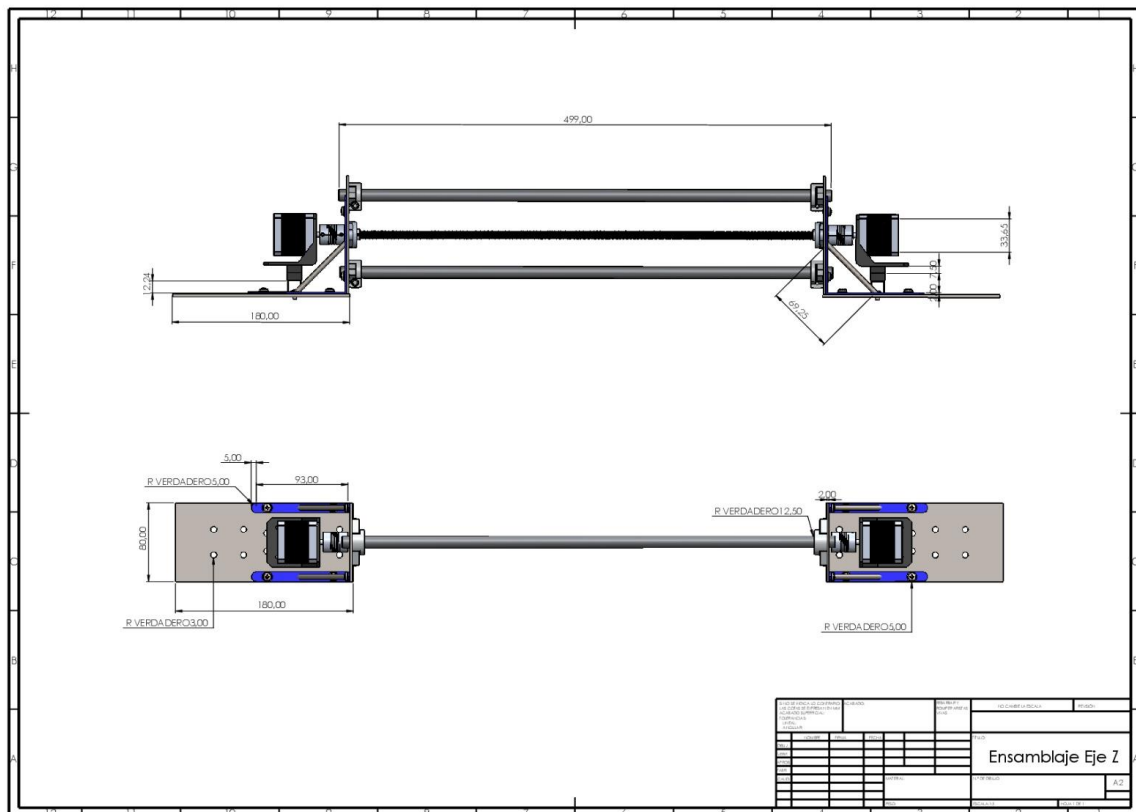
Ilustración 17. Cotas del eje Y.



Fuente. Autores.

El ensamblaje del eje Y, como se muestra en el plano técnico, incluye un sistema de guías lineales soportadas por cuatro rodamientos de deslizamiento que aseguran un movimiento preciso, controlado y estable. La estructura cuenta con una longitud total de 377.00 mm y una distancia entre las guías de 40.00 mm, proporcionando un soporte adecuado y equilibrado para la carga aplicada durante su operación. El motor paso a paso tiene una altura total de 43.30 mm y está acoplado a una varilla roscada para generar el movimiento lineal necesario. Las cotas indican que la distancia entre los puntos de fijación y los rodamientos es de 35.00 mm. El sistema de guías lineales, que se extiende a lo largo de 299.00 mm, está firmemente montado sobre una base rígida y resistente, lo que asegura su estabilidad durante el desplazamiento. Los cuatro rodamientos, dispuestos simétricamente en pares, permiten distribuir la carga de manera uniforme a lo largo del eje Y. La altura total del ensamblaje, desde la base hasta la parte superior del motor, es de 279.00 mm

Ilustración 18. Cotas del eje Z.



*Fuente. Autores.*

El ensamblaje del eje Z, como se muestra en el plano, está compuesto por guías lineales y un motor paso a paso, que a través de un acople impulsa una varilla roscada para el desplazamiento lineal. El eje Z tiene una longitud total de 499.00 mm, con una altura total del soporte principal de 124.00 mm desde la base. Las dimensiones del soporte del motor son de 80.00 mm por 93.00 mm, con un radio de 5.00 mm en los puntos de fijación para una correcta alineación y ensamblaje. La distancia desde el motor hasta el final del soporte es de 180.00 mm, permitiendo una adecuada distribución de la carga. En la vista lateral se observa la distancia entre el motor y la base de soporte, que es de 63.50 mm, mientras que la longitud del conjunto de transmisión a través de la correa alcanza los 69.85 mm, asegurando un recorrido estable y sin interferencias. La altura de la sección lateral del soporte del motor es de 33.50 mm, y se complementa con una base reforzada que facilita la correcta fijación del motor y otros componentes. Los puntos de acople con los elementos lineales y los motores están detallados con radios verdaderos de 3.00 mm y 12.50 mm en las secciones de los soportes. Este diseño, con sus componentes y dimensiones, asegura una estabilidad óptima y un control preciso del movimiento vertical, que es fundamental en el proceso de manufactura para drones en las PYMES agrícolas.

#### 6.4. ENSAMBLE

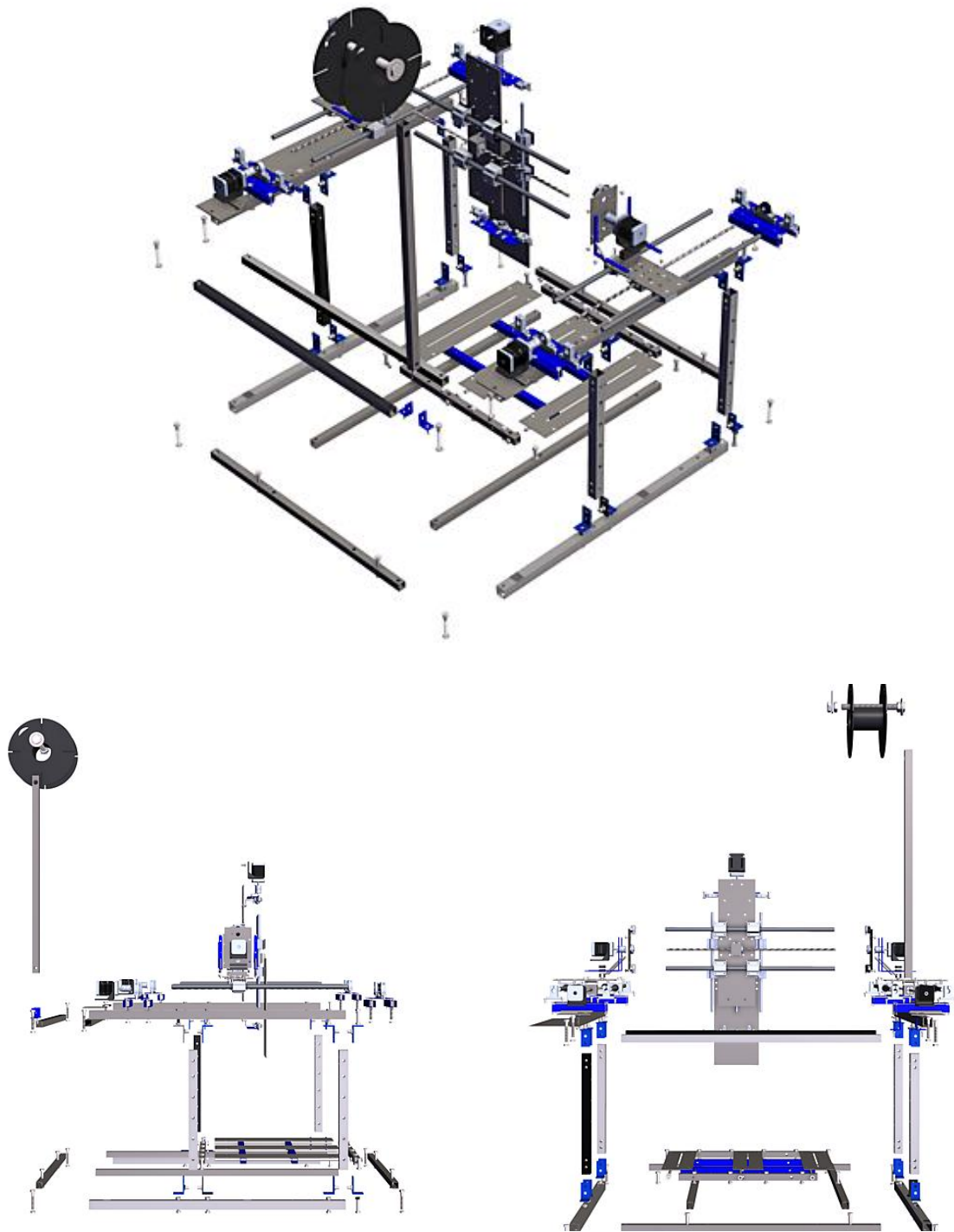
El ensamble del diseño CAD para la máquina multifunción de fabricación de frame y brazos de drones enfocados a la agricultura presenta una estructura integral diseñada para cumplir los objetivos del proyecto. La base y el marco principal están contruidos con acero ASTM A36, proporcionando la rigidez y resistencia necesarias para las operaciones de precisión requeridas. El sistema incorpora tres ejes de movimiento (X, Y, Z), característicos de las máquinas CNC, que permiten el posicionamiento preciso para las funciones de impresión 3D, mecanizado de PCB y corte láser.

La columna vertical, que constituye el eje Y, soporta un cabezal multifuncional diseñado para albergar las diferentes herramientas necesarias para cada operación. Los ejes X e Z se implementan mediante guías lineales y sistemas de transmisión, asegurando la exactitud en los movimientos tridimensionales. El diseño integra componentes específicos, identificables por su color azul, que podrían ser piezas críticas para la funcionalidad de la máquina.

En la parte superior del ensamble, se observa un carrete negro destinado al filamento PETG para la función de impresión 3D, lo que confirma la capacidad de fabricación aditiva de la máquina. El modelado detallado de componentes como motores, acoplamientos y sistemas de sujeción refleja un diseño minucioso que considera aspectos de ensamblaje, operación y mantenimiento.

Este diseño CAD materializa la integración efectiva de las capacidades de impresión 3D, mecanizado de PCB y corte láser en una única máquina, alineándose con el objetivo de desarrollar una solución multifuncional. La selección de materiales, como el acero ASTM A36 para la estructura principal, y la atención a los detalles en el diseño de los sistemas de movimiento y herramientas, demuestran un enfoque orientado a la precisión y durabilidad, factores cruciales para su aplicación en el contexto de las PYMES agrícolas colombianas.

Ilustración 19. Vistas del prototipo diseñado en Solidworks

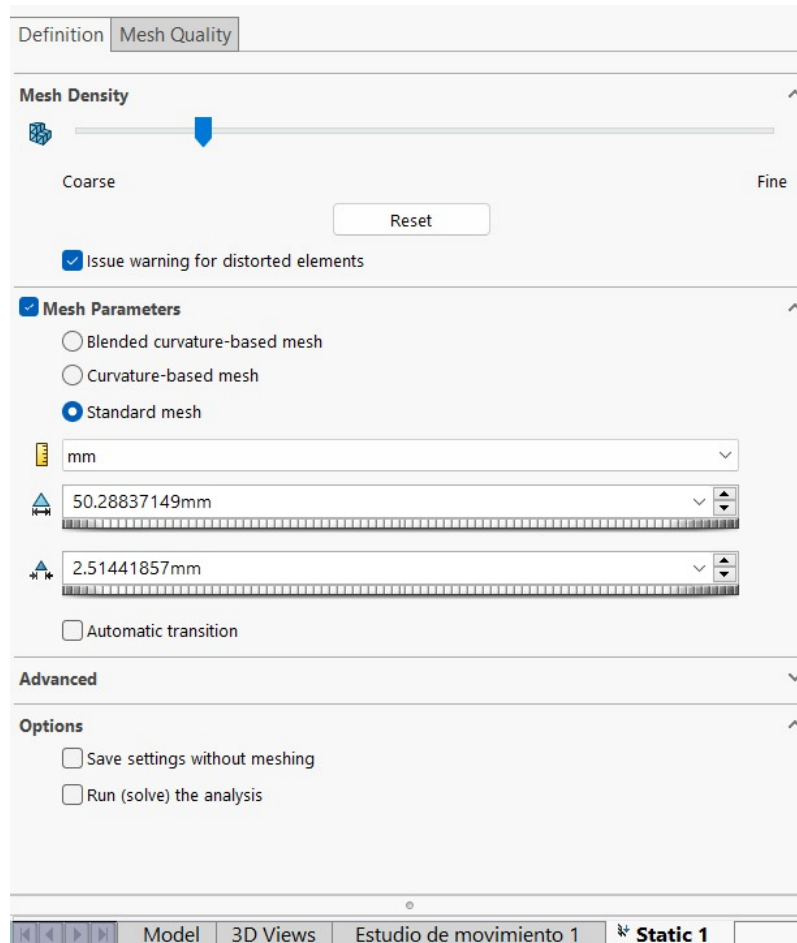


Fuente. Autores.

## 6.5. ANALISIS ESTATICO

La imagen siguiente muestra una configuración inicial para un análisis estático en el software SolidWorks, enfocado en el estudio de deformación y resistencia de una máquina multifuncional bajo carga.

Ilustración 20. Definición estándar para el análisis estático.



Fuente. Autores.

A continuación, se describen los parámetros relevantes:

Densidad de Malla (Mesh Density):

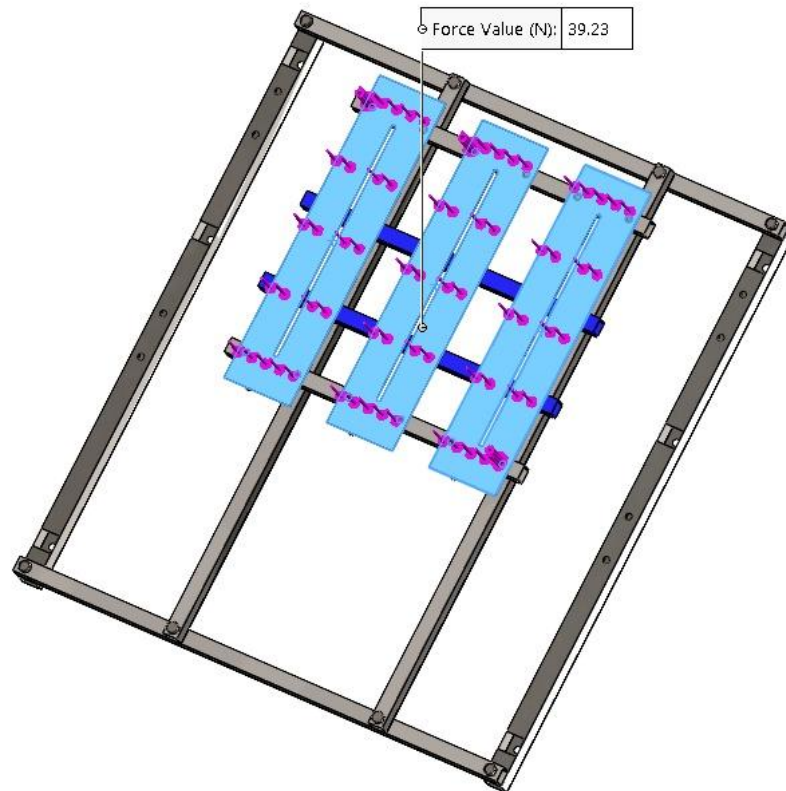
- ✓ Un control deslizante que permite ajustar la densidad de la malla entre "Gruesa" (Coarse) y "Fina" (Fine), lo cual influye en la precisión del análisis. Una malla más fina generará un resultado más preciso, pero aumentará el tiempo de cálculo.

- ✓ Existe una opción para emitir advertencias en caso de que se detecten elementos distorsionados en la malla, lo cual es útil para garantizar que la calidad del mallado sea adecuada para un análisis confiable.

#### Parámetros de Malla (Mesh Parameters):

- ✓ La opción seleccionada es la Malla Estándar (Standard Mesh), aunque se ofrecen otras opciones como la malla basada en curvaturas.
- ✓ Las unidades seleccionadas son milímetros (mm).
- ✓ Se especifican dos valores clave para el tamaño de los elementos de la malla: el primero es el tamaño global de 50.28837149 mm, y el segundo valor de 2.51441857 mm corresponde a un control más preciso de las características pequeñas de la geometría.

*Ilustración 21. Aplicación de fuerzas sobre la mesa de trabajo con 12Kgf.*



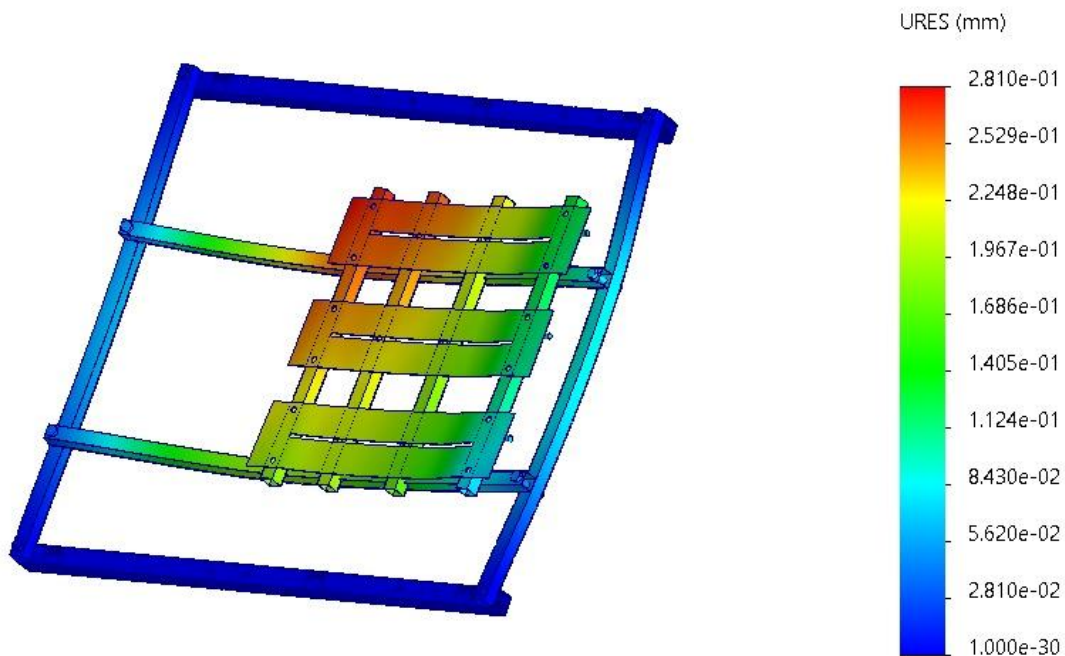
*Fuente. Autores.*

Cada una de las tres placas ha recibido una carga repartida de manera uniforme, con un valor individual equivalente a un tercio de la carga total. Esto se traduce en aproximadamente 39.23 N por punto de aplicación, como se observa en el detalle de la imagen. La carga se distribuye a través de varios puntos en las superficies de las placas, lo que asegura una carga equitativa en toda la estructura.

Orientación y dirección de la fuerza: Las fuerzas se aplican perpendicularmente a las superficies de las placas (carga normal) y en la dirección negativa del eje vertical, simulando el peso de un objeto colocado sobre la mesa. Este tipo de carga representa el esfuerzo que la estructura deberá soportar en condiciones de uso real, evaluando así la deformación y resistencia de la mesa bajo la acción de 12 kgf.

Soportes y condiciones de frontera: Los extremos de las barras laterales están fijados mediante apoyos que restringen el movimiento en todas las direcciones. Esta condición permite evaluar con precisión cómo las placas centrales soportan la mayor parte del peso mientras el marco exterior proporciona estabilidad.

*Ilustración 22. Análisis de desplazamiento de la mesa de trabajo con 12Kgf.*



*Fuente. Autores.*

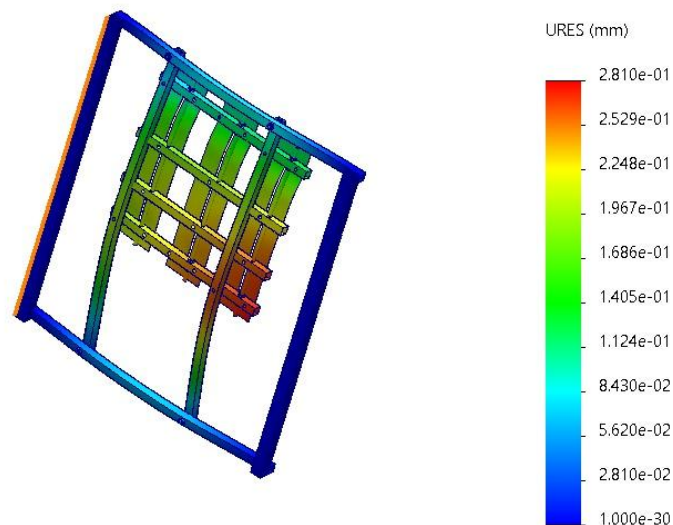
Escala de Colores: La escala va de azul oscuro (desplazamiento mínimo) a rojo (máximo). El valor más bajo es casi nulo  $1.000e^{-30}$  mm, mientras que el más alto es de 0.281 mm, indicando la mayor deformación bajo 12 kgf.

Distribución del Desplazamiento: Las zonas centrales de la mesa presentan mayor desplazamiento (verde a rojo), mientras que el marco lateral (azul) tiene menor deformación, mostrando mayor rigidez.

Magnitud del Desplazamiento: El desplazamiento máximo es de 0.281 mm, lo que indica buena resistencia y flexión limitada en las áreas centrales.

La estructura parece ser bastante resistente, con desplazamientos moderados bajo una carga de 12 kgf. La deformación máxima es menor a 0.3 mm, lo que indica que la mesa puede soportar la carga sin una deformación excesiva. Las zonas periféricas del marco son más rígidas, lo que sugiere que los soportes laterales proporcionan una buena estabilidad estructural. Los paneles centrales de la mesa de trabajo son los más afectados por la carga y podrían requerir un refuerzo o materiales más resistentes si se prevé un uso bajo cargas mayores.

*Ilustración 23. Punto de deformación más crítico con 12Kgf.*



*Fuente. Autores.*

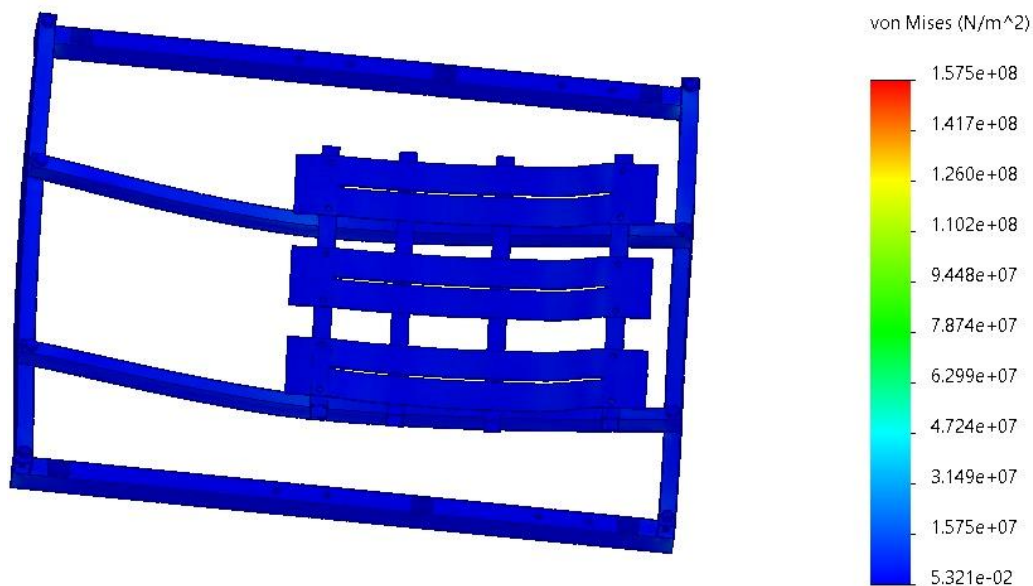
El punto que sufrirá mayor deformación bajo carga aumentada se encuentra en la esquina superior izquierda de la estructura central. Esta área se muestra en color rojo/naranja, indicando los valores más altos en la escala de deformaciones (cerca de 0.2810 mm).

La deformación disminuye gradualmente hacia las partes inferiores y exteriores de la estructura, como se evidencia por la transición de colores del rojo al azul.

El marco exterior muestra la menor deformación, representado en azul oscuro, lo que sugiere una mayor rigidez en estas zonas.

Esta distribución de deformaciones indica que, al aumentar la carga, la esquina superior izquierda de la estructura interna será la más propensa a deformarse, pudiendo afectar potencialmente la precisión de la máquina en esa área específica.

*Ilustración 24. Análisis de tensión de la mesa de trabajo con 12Kgf.*



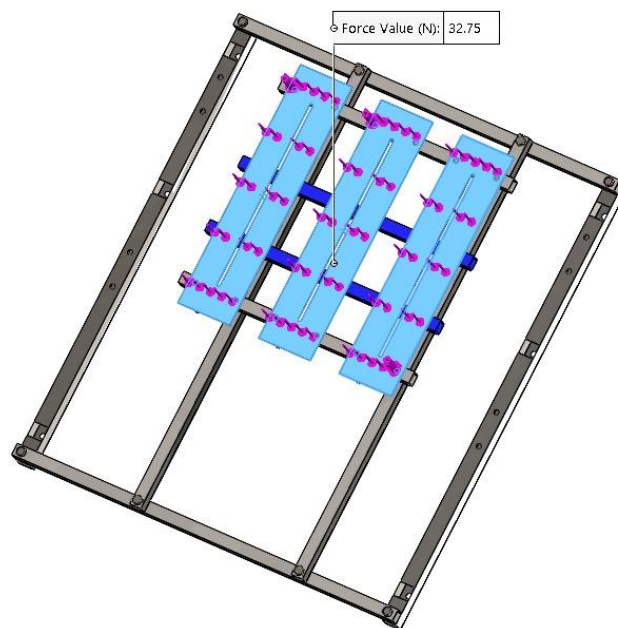
*Fuente. Autores.*

El estudio de tensión de von Mises realizado sobre la mesa de trabajo de la máquina multifuncional, bajo una carga de 12 kgf, revela resultados favorables:

- ✓ Distribución de tensiones: Uniformemente baja en toda la estructura.
- ✓ Rango de tensiones: De  $5.321e-02 \text{ N/m}^2$  a  $1.575e+08 \text{ N/m}^2$ .
- ✓ Deformaciones: Aparentemente mínimas, beneficiando la precisión de la máquina.
- ✓ Rigidez estructural: Elevada, adecuada para una mesa de trabajo de precisión.

El diseño actual demuestra ser efectivo en minimizar deformaciones, contribuyendo así a mantener la precisión operativa de la máquina multifuncional.

*Ilustración 25. Aplicación de fuerzas sobre la mesa de trabajo con 10Kgf.*



*Fuente. Autores.*

El software de análisis por elementos finitos utilizado para esta simulación calculó automáticamente la fuerza resultante total, que se muestra en la imagen como 32.75 N (Newtons). Esta conversión de unidades (de kgf a N) es consistente con la carga aplicada, ya que 10 kgf equivalen aproximadamente a 98.1 N, considerando la aceleración debido a la gravedad.

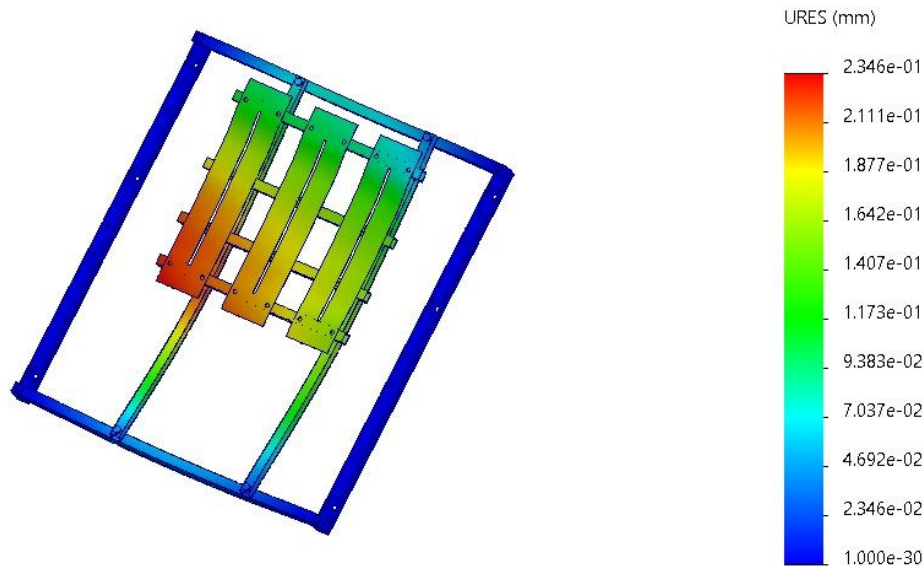
La aplicación de esta carga permite evaluar:

- ✓ La distribución de esfuerzos en las placas y el marco de soporte.
- ✓ Las deformaciones resultantes en la estructura.

- ✓ La integridad estructural del conjunto bajo condiciones de carga previstas.

Este enfoque de carga proporciona una representación realista de las fuerzas que podrían actuar sobre la estructura en condiciones operativas normales, permitiendo un análisis comprehensivo de su desempeño mecánico.

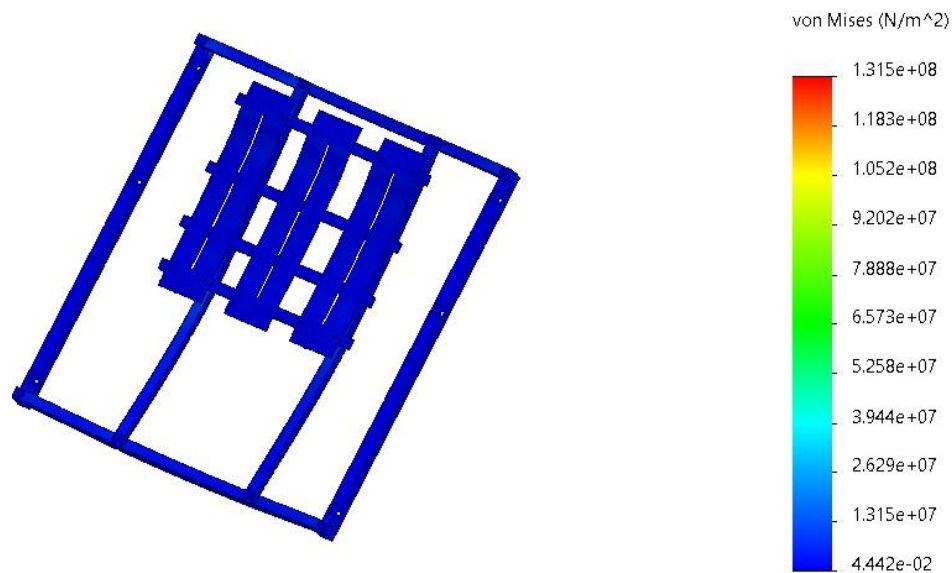
*Ilustración 26. Análisis de desplazamiento de la mesa de trabajo con 10Kgf.*



*Fuente. Autores.*

Los resultados indican un desplazamiento máximo de 0.2346 mm, localizado principalmente en las zonas centrales de las placas, con énfasis en la placa izquierda. El marco exterior exhibe una rigidez satisfactoria, evidenciada por desplazamientos mínimos. Se observa un gradiente de deformación que disminuye desde el centro hacia los bordes de las placas. Esta magnitud de deformación, aunque relativamente modesta, podría impactar la precisión en operaciones que demanden tolerancias extremadamente ajustadas. Para aplicaciones que requieran precisión submilimétrica, estas deformaciones podrían ser significativas y requerir consideración.

Ilustración 27. Análisis de tensión de la mesa de trabajo con 10Kgf.



Fuente. Autores.

Los resultados indican un rango de tensiones que va desde un mínimo de  $4.442e-02 \text{ N/m}^2$  hasta un máximo de  $1.315e+08 \text{ N/m}^2$ . La mayor parte de la estructura, incluyendo el marco exterior y las placas centrales, exhibe niveles de tensión en el rango inferior, representado por el color azul predominante en la imagen.

La distribución uniforme de bajas tensiones en la mayoría de la estructura sugiere un diseño eficiente que distribuye adecuadamente las cargas aplicadas. Esto es favorable para mantener la precisión de la máquina, ya que minimiza las deformaciones localizadas.

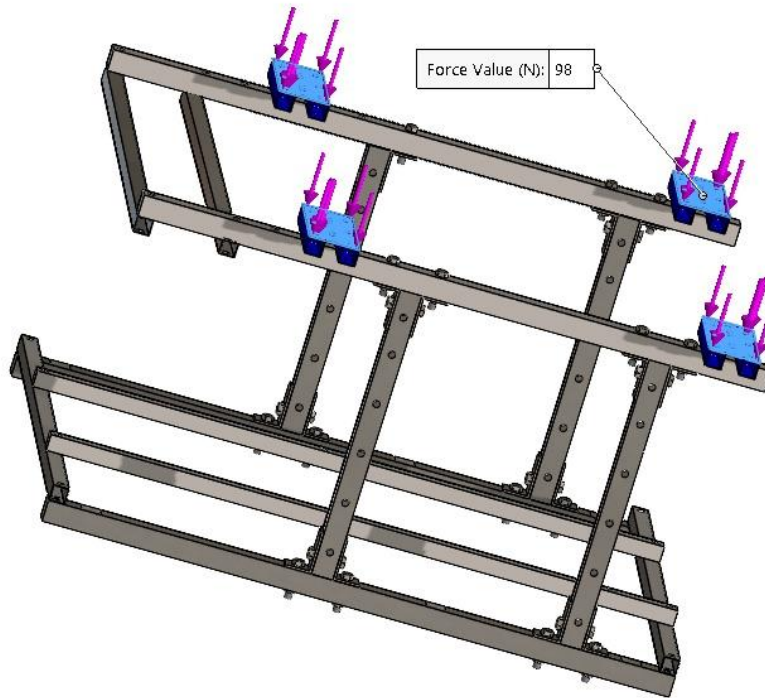
El análisis de tensiones indica un comportamiento estructural satisfactorio bajo la carga aplicada. La concentración de esfuerzos parece estar dentro de límites aceptables, lo cual es crucial para mantener la precisión operativa de la máquina.

Tabla 3. Resumen de análisis de la mesa de trabajo con 10kgf y 12kgf.

<b>Parámetro</b>	<b>Detalles</b>
<b>Densidad de Malla</b>	Ajuste entre "Gruesa" y "Fina"; malla fina más precisa, pero tiempo de cálculo mayor. Advertencias para elementos distorsionados.
<b>Parámetros de Malla</b>	Malla Estándar. Unidades: milímetros (mm). Tamaño global de los elementos: 50.288 mm; control preciso: 2.514 mm.
<b>Aplicación de Cargas (12 Kgf)</b>	Carga distribuida uniformemente entre tres placas. Fuerza por punto de aplicación: 39.23 N. Dirección perpendicular (negativa del eje vertical).
<b>Desplazamiento (12 Kgf)</b>	Desplazamiento máximo: 0.281 mm. Áreas centrales más afectadas (verde a rojo); marco lateral más rígido (azul).
<b>Punto de Deformación Crítico</b>	Esquina superior izquierda de la estructura central. Deformación máxima cerca de 0.281 mm. Menor deformación en el marco exterior.
<b>Análisis de Tensión (12 Kgf)</b>	Rango de tensiones: 5.321e-02 N/m <sup>2</sup> a 1.575e+08 N/m <sup>2</sup> . Tensión uniformemente baja. Rigidez estructural alta.
<b>Aplicación de Cargas (10 Kgf)</b>	Carga total: 32.75 N (aprox. 98.1 N convertidos de 10 kgf). Evaluación de distribución de esfuerzos y deformaciones.
<b>Desplazamiento (10 Kgf)</b>	Desplazamiento máximo: 0.2346 mm. Zonas centrales más afectadas, marco exterior con mínima deformación.
<b>Análisis de Tensión (10 Kgf)</b>	Rango de tensiones: 4.442e-02 N/m <sup>2</sup> a 1.315e+08 N/m <sup>2</sup> . Tensión uniformemente baja. Diseño eficiente para distribución de cargas.

Fuente. Autores.

Ilustración 28. Aplicación de fuerzas sobre los 4 puntos de trabajo con 40Kgf.



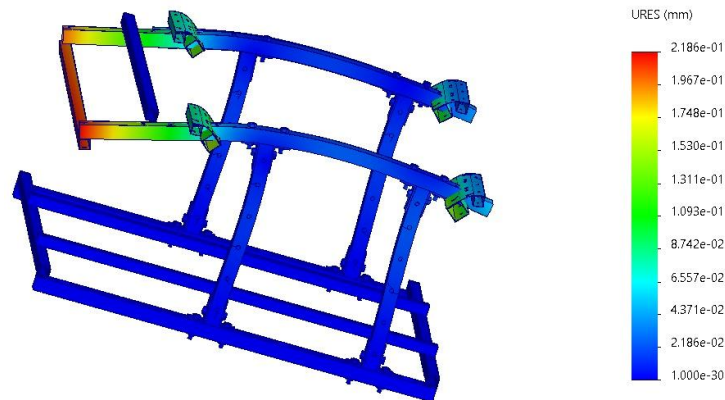
Fuente. Autores.

El análisis estructural se realizó aplicando una carga total de 40 kilogramos-fuerza (kgf) sobre el bastidor metálico mostrado en la imagen. Esta carga se distribuyó equitativamente entre cuatro puntos específicos ubicados en los elementos horizontales superiores de la estructura.

Cada uno de estos cuatro puntos recibió una carga vertical descendente de 10 kgf, equivalente a aproximadamente 98 Newtons (N), lo cual corresponde con el valor indicado en la imagen ("Force Value (N): 98").

Los puntos de aplicación de las cargas están representados visualmente mediante símbolos de fuerza en color azul y morado. Esta configuración de carga simula una distribución uniforme del peso sobre la estructura, lo que permite evaluar su comportamiento mecánico y capacidad de soporte bajo condiciones controladas.

*Ilustración 29. Análisis de desplazamiento de los cuatro puntos de trabajo con 40Kgf.*

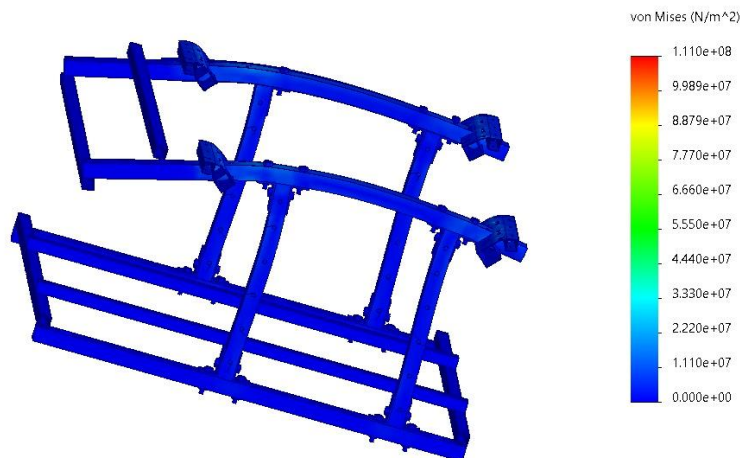


*Fuente. Autores.*

Se realizó un estudio de desplazamiento en los cuatro puntos de trabajo principales de una máquina multifuncional, sometida a una carga total de 40 kgf. El análisis reveló lo siguiente:

Los desplazamientos máximos observados en las zonas de trabajo oscilan entre 0.15 mm y 0.19 mm aproximadamente, con un valor máximo registrado de 0.2186 mm en la estructura. Estas deformaciones, aunque relativamente pequeñas, podrían afectar la precisión de la máquina en aplicaciones que requieren alta exactitud. La distribución de los desplazamientos muestra una gradación desde la base, que presenta menor deformación, hacia los puntos superiores de aplicación de carga, donde se observan los mayores desplazamientos.

*Ilustración 30. Análisis de tensión de los cuatro puntos de trabajo con 40Kgf*



*Fuente. Autores.*

Se realizó un estudio de tensión de von Mises en una máquina multifuncional sometida a una carga total de 40 kgf distribuida en cuatro puntos de trabajo. El análisis arrojó los siguientes resultados:

La estructura presenta una distribución de tensiones predominantemente uniforme, con la mayoría de los componentes mostrando un color azul oscuro, lo que indica niveles de tensión bajos, cercanos a 0 N/m<sup>2</sup>.

Los puntos de aplicación de carga y sus áreas adyacentes exhiben concentraciones de tensión ligeramente más elevadas, visibles como regiones de color azul más claro. Sin embargo, estas tensiones siguen siendo relativamente bajas en la escala presentada.

El valor máximo de tensión observado en la escala es de 1.110e+08 N/m<sup>2</sup>, aunque no se aprecia claramente en la estructura ninguna zona que alcance este nivel de tensión.

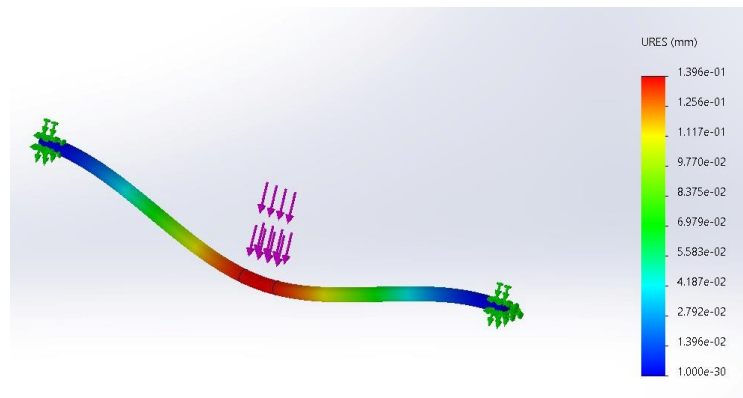
En general, la distribución uniforme de tensiones y los bajos niveles observados sugieren que la estructura está bien diseñada para soportar las cargas aplicadas sin experimentar estrés significativo. Esto indica que la máquina debería mantener su precisión bajo las condiciones de carga especificadas, ya que las deformaciones inducidas por tensión serían mínimas.

*Tabla 4. Resumen de análisis de los cuatro puntos de trabajo con 40kgf.*

<b>Parámetro</b>	<b>Detalles</b>
<b>Aplicación de Cargas (40 Kgf)</b>	Carga total distribuida en cuatro puntos (10 kgf cada uno, aprox. 98 N por punto). Evaluación de capacidad de soporte bajo carga.
<b>Desplazamiento (40 Kgf)</b>	Desplazamientos máximos entre 0.15 mm y 0.19 mm, con un máximo de 0.2186 mm. Mayor desplazamiento en puntos superiores de carga.
<b>Análisis de Tensión (40 Kgf)</b>	Distribución uniforme de tensiones. Niveles bajos cercanos a 0 N/m <sup>2</sup> . Máxima tensión observada: 1.110e+08 N/m <sup>2</sup> . Diseño adecuado para cargas especificadas.

*Fuente. Autores.*

Ilustración 31. Análisis de desplazamiento del eje X y Y con 5kgf.

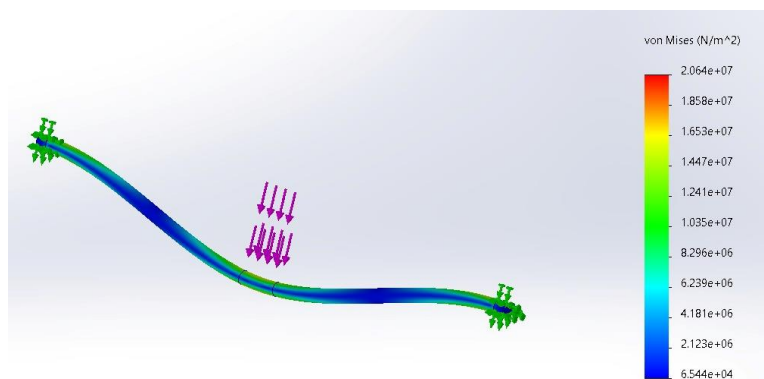


Fuente. Autores.

Se ha realizado un análisis de desplazamiento de una varilla utilizada en los ejes X y Y de una máquina multifuncional bajo una carga de 5 kgf. Los resultados del análisis son los siguientes:

- La escala de colores varía desde desplazamientos mínimos ( $1.000e-30$  mm, representados en azul oscuro) hasta máximos ( $0.1396$  mm, en rojo).
- La mayor deformación se localiza en la región central de la varilla, donde se aplican las fuerzas.
- Los extremos de la varilla muestran deformaciones menores, indicando una mayor rigidez en estas áreas.

Ilustración 32. Análisis de tensión del eje X y Y con 5kgf.



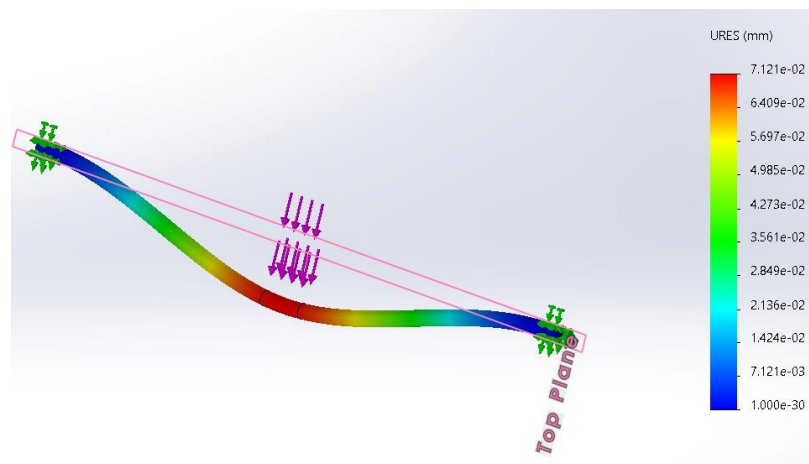
Fuente. Autores.

Se ha llevado a cabo un análisis de tensión de una varilla utilizada en los ejes X y Y de una máquina

multifuncional bajo una carga de 5 kgf. Los resultados del análisis son los siguientes:

- Las mayores tensiones se localizan en la región central de la varilla, donde se aplican las fuerzas.
- Los extremos de la varilla presentan tensiones menores, sugiriendo una mayor resistencia en estas áreas.
- El análisis muestra que la varilla experimenta esfuerzos máximos de hasta  $2.064 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup> bajo una carga de 5 kgf, con las mayores tensiones en la región central.

Ilustración 33. Análisis de desplazamiento del eje X y Y con 2.5kgf.



Fuente. Autores.

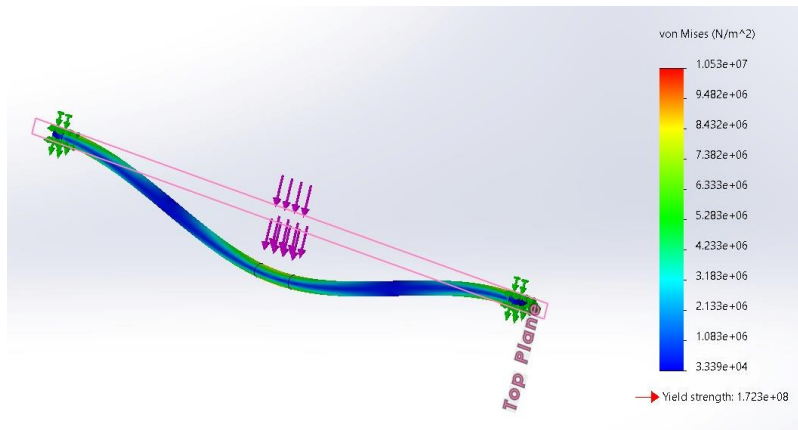
Se ha realizado un análisis de elementos finitos para evaluar la deformación de una varilla utilizada en los ejes X e Y de una máquina multifuncional. El objetivo es determinar la magnitud de las deformaciones que pueden afectar la precisión del equipo.

Metodología:

- Se aplicó una carga de 2.5 kgf (kilogramos fuerza) a la varilla y se midieron los desplazamientos resultantes mediante simulación computacional.
- Se observa un gradiente de deformación a lo largo de la varilla.
- La deformación máxima se localiza en la región central.

- Los extremos de la varilla muestran deformación mínima, sugiriendo puntos de fijación.
- La deformación máxima registrada de 0.07121 mm bajo una carga de 2.5 kgf es relativamente modesta.

Ilustración 34. Análisis de tensión del eje X y Y con 2.5kgf.



Fuente. Autores.

Se ha llevado a cabo un análisis de elementos finitos para evaluar la distribución de tensiones en una varilla empleada en los ejes X e Y de una máquina multifuncional. El propósito es determinar la magnitud y distribución de las tensiones que podrían afectar la integridad estructural y la precisión operativa del equipo.

Metodología:

- Se aplicó una carga de 2.5 kgf (kilogramos fuerza) a la varilla y se analizaron las tensiones resultantes mediante simulación computacional, utilizando el criterio de von Mises para la evaluación de tensiones.
- Se observa un gradiente de tensiones a lo largo de la varilla.
- Las tensiones máximas se localizan en la región central, coincidiendo con el punto de aplicación de la carga.
- Los extremos de la varilla exhiben tensiones mínimas, indicando los puntos de fijación o

soporte.

- La tensión máxima registrada de 10.53 MPa bajo una carga de 2.5 kgf es significativamente inferior al límite elástico del material (172.3 MPa). Esto indica que la varilla opera dentro de su régimen elástico con un amplio margen de seguridad.

Tabla 5. Resumen de análisis de la varilla del eje X y Y con 5kgf y 2.5kgf.

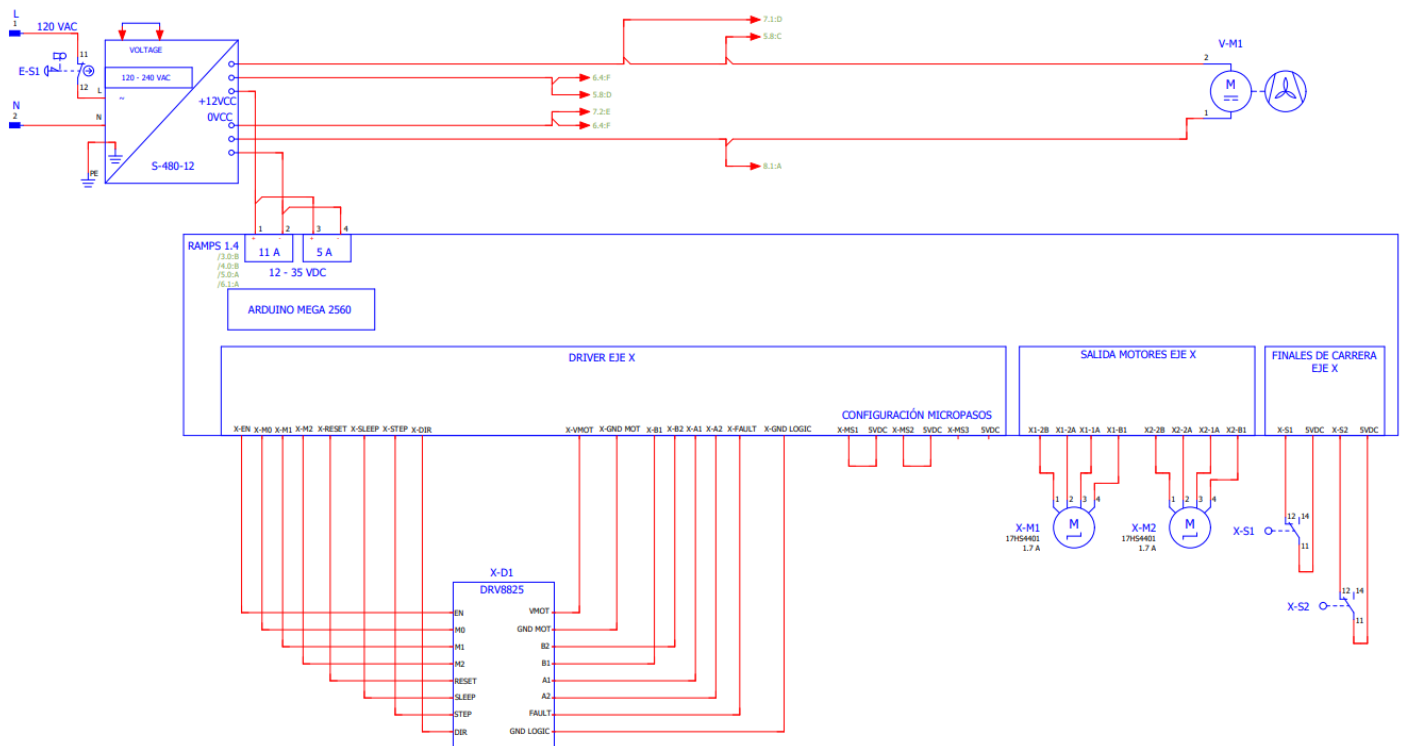
<b>Parámetro</b>	<b>Detalles</b>
<b>Desplazamiento (5 Kgf)</b>	Desplazamiento máximo de 0.1396 mm. La mayor deformación se localiza en la región central de la varilla, donde se aplican las fuerzas. Los extremos muestran deformaciones menores, indicando mayor rigidez en estas áreas.
<b>Análisis de Tensión (5 Kgf)</b>	Tensión máxima de 2.064e+07 N/m <sup>2</sup> (20.64 MPa). Las mayores tensiones se localizan en la región central de la varilla. Los extremos presentan tensiones menores, sugiriendo una mayor resistencia en estas áreas.
<b>Desplazamiento (2.5 Kgf)</b>	Desplazamiento máximo de 0.07121 mm. Se observa un gradiente de deformación a lo largo de la varilla, con la deformación máxima en la región central. Los extremos muestran deformación mínima, sugiriendo puntos de fijación.
<b>Análisis de Tensión (2.5 Kgf)</b>	Tensión máxima de 1.053e+07 N/m <sup>2</sup> (10.53 MPa). Las tensiones máximas se localizan en la región central, coincidiendo con el punto de aplicación de la carga. Los extremos exhiben tensiones mínimas. La tensión máxima es significativamente inferior al límite elástico del material (172.3 MPa), indicando que la varilla opera dentro de su régimen elástico con amplio margen de seguridad.

Fuente. Autores.

## 6.6. DISEÑO ELECTRICO

El diseño eléctrico de la máquina multifuncional asegura la integración eficiente y segura de los diversos componentes, como los motores paso a paso, controladores y drivers. A través de una estructura modular basada en Arduino Mega 2560 y la placa RAMPS 1.4, se garantiza la coordinación precisa entre los ejes X, Y y Z. A continuación, se presenta el esquema del diseño eléctrico para cada uno de los ejes, detallando sus respectivos componentes y conexiones.

Ilustración 35. Diagrama eléctrico eje X



Fuente. Autores.

El sistema de control del eje X en la máquina multifuncional está diseñado para garantizar movimientos precisos y confiables. Este circuito utiliza una combinación de controladores, drivers y motores paso a paso, integrados mediante una estructura basada en Arduino Mega 2560 y la placa RAMPS 1.4. A continuación, se describen los componentes principales y su funcionamiento dentro del sistema:

- 1) Fuente de Alimentación: el sistema se alimenta mediante una fuente de 12V DC (S-480-12), la

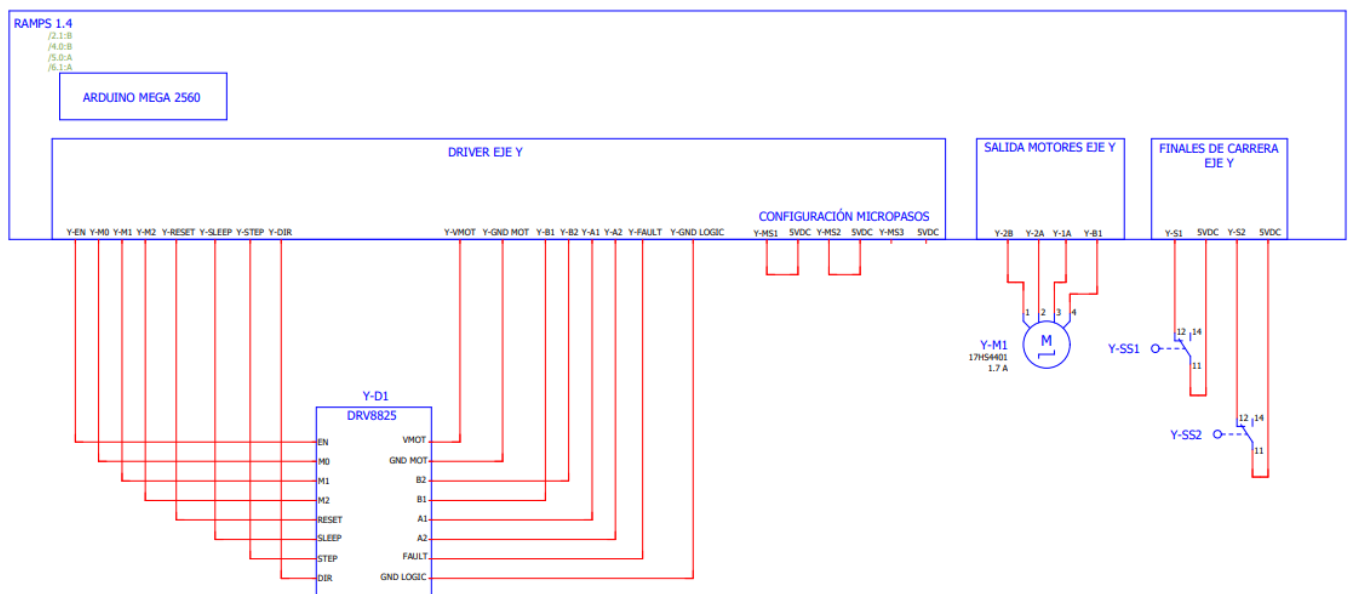
cual distribuye energía a todos los componentes electrónicos. Esta fuente provee diferentes líneas de corriente, entre ellas, una de 11A para los motores paso a paso y otra de 5A para los circuitos de control. La adecuada distribución de energía es esencial para asegurar el correcto funcionamiento del sistema bajo las condiciones operativas definidas.

- 2) Controlador Principal: el Arduino Mega 2560 actúa como el cerebro del sistema, siendo responsable de recibir las instrucciones desde el software y traducirlas en señales de control para los diferentes actuadores. La placa RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) está montada sobre el Arduino y sirve como interfaz para conectar los drivers de los motores, permitiendo además la gestión de las entradas y salidas del sistema.
- 3) Driver del Eje X: el eje X está accionado mediante un driver DRV8825, el cual se encarga de controlar los motores paso a paso conectados a este eje. Este driver recibe señales de la RAMPS 1.4, como la señal de dirección (X-DIR) y la señal de pasos (X-STEP), que determinan el movimiento del motor. El DRV8825 también permite la configuración de micro-pasos, lo cual es esencial para obtener una mayor precisión en el posicionamiento de los motores. La posibilidad de ajustar los micro-pasos mediante pines dedicados (MS1, MS2, MS3) permite optimizar la resolución del movimiento del eje X.
- 4) Motores Paso a Paso: el sistema del eje X emplea dos motores paso a paso (NEMA17) con una corriente nominal de 1.7A, encargados de mover la estructura de la máquina en este eje. Estos motores están sincronizados para garantizar un desplazamiento preciso y sincrónico de los componentes móviles, lo cual es fundamental para mantener la calidad en los procesos de fabricación, como la impresión 3D, el corte láser y el mecanizado de PCB.
- 5) Finales de Carrera: se han implementado finales de carrera (X-S1 y X-S2) en el eje X, los cuales se utilizan como sistemas de seguridad para limitar el recorrido del eje. Estos dispositivos

interrumpen el movimiento de los motores cuando la máquina alcanza los límites físicos predeterminados, protegiendo así los componentes y evitando sobrecargas o daños mecánicos.

- 6) Configuración de Micro-pasos: la configuración de micro-pasos es fundamental para ajustar la precisión del movimiento del eje X. El driver DRV8825 permite seleccionar diferentes configuraciones de micro-pasos mediante los pines de entrada MS1, MS2 y MS3, lo que permite ajustar el número de pasos por revolución del motor. Esto resulta crucial para los procesos que requieren alta precisión, como el grabado en PCB y la impresión 3D de alta calidad.
- 7) Seguridad: para garantizar la seguridad operativa, se ha incorporado un botón de parada de emergencia que, al activarse, corta inmediatamente el suministro eléctrico de la máquina. Este sistema asegura que, ante cualquier situación de riesgo, tanto el operario como la máquina estén protegidos, evitando daños tanto a las personas como a los componentes electrónicos y mecánicos.

Ilustración 36. Diagrama eléctrico eje Y



Fuente. Autores.

El sistema de control del eje Y de la máquina multifuncional sigue una arquitectura similar a la

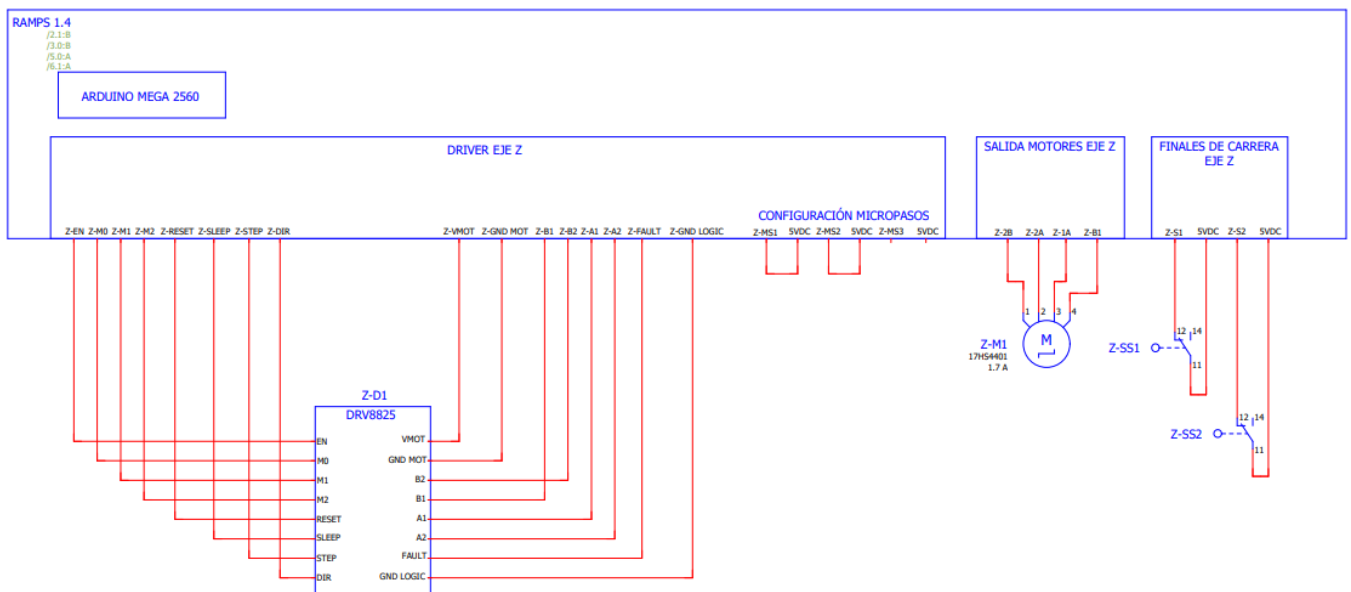
del eje X, utilizando componentes integrados que aseguran un funcionamiento eficiente y preciso. A continuación, se describen los componentes del circuito y su funcionamiento:

- ✓ Controlador Principal: al igual que en el eje X, el sistema del eje Y utiliza un Arduino Mega 2560 conectado a una placa RAMPS 1.4, que actúa como interfaz entre el controlador y los motores paso a paso. Este conjunto se encarga de gestionar las señales de control enviadas desde el software y convertirlas en instrucciones eléctricas que dirigen el movimiento del eje Y.
- ✓ Driver del Eje Y: el control del movimiento del eje Y está a cargo del driver DRV8825, que recibe señales desde la RAMPS para gestionar el funcionamiento del motor paso a paso asociado a este eje. El driver maneja las señales de paso (Y-STEP) y dirección (Y-DIR), que controlan el movimiento del motor, y también permite ajustar la resolución de los pasos mediante la configuración de micro-pasos (MS1, MS2, MS3). Esto facilita un control preciso del movimiento lineal a lo largo del eje Y.
- ✓ Motores Paso a Paso: el eje Y está accionado por un motor paso a paso NEMA17, con una corriente nominal de 1.7A, que permite el desplazamiento del cabezal de la máquina en dicho eje. La correcta sincronización de este motor garantiza un movimiento suave y controlado, esencial para procesos como la impresión 3D y el corte láser, que requieren alta precisión.
- ✓ Finales de Carrera: se integran dos finales de carrera (Y-SS1 y Y-SS2) al sistema del eje Y. Estos dispositivos actúan como limitadores físicos del recorrido del eje, protegiendo al sistema de posibles daños mecánicos o sobrecargas. Al alcanzarse los límites de recorrido, los finales de carrera envían señales al controlador para detener el movimiento del motor, asegurando una operación segura.
- ✓ Configuración de Micro-pasos; el driver DRV8825 permite la configuración de los micro-pasos

del motor, utilizando los pines dedicados MS1, MS2, y MS3. Esto permite ajustar el número de pasos por revolución, lo que incrementa la precisión del posicionamiento del motor. La capacidad de ajustar los micro-pasos es fundamental en aplicaciones que requieren alta resolución, como el mecanizado de PCB o la impresión de detalles finos en piezas 3D.

- ✓ Salida de Motores del Eje Y: el sistema cuenta con una salida dedicada para el control de los motores del eje Y, permitiendo una gestión adecuada de las señales eléctricas y el flujo de corriente hacia los motores. Las conexiones de salida (Y-M1) están diseñadas para alimentar el motor paso a paso, asegurando una operación fluida y consistente en los movimientos a lo largo de este eje.
- ✓ Seguridad: al igual que en el eje X, el sistema incluye finales de carrera que protegen los límites físicos del movimiento, así como configuraciones de micro-pasos que aseguran la precisión del sistema. La gestión eléctrica, además, está diseñada para cumplir con los estándares de seguridad, evitando sobrecargas o fallos en los componentes eléctricos y electrónicos.

Ilustración 37. Diagrama eléctrico eje Z



Fuente. Autores.

El control del eje Z es esencial en la máquina multifuncional, ya que permite la correcta interacción

con los materiales durante las operaciones de mecanizado, corte láser e impresión 3D. A continuación, se describen los componentes del circuito y su funcionamiento:

- ✓ **Controlador Principal:** es un Arduino Mega 2560 conectado a una placa RAMPS 1.4, que se encarga de la gestión y control de los tres ejes de la máquina. En el caso del eje Z, el Arduino recibe las instrucciones de control desde el software de diseño y envía las señales correspondientes al driver del motor para ejecutar los movimientos verticales.
- ✓ **Driver del Eje Z:** el DRV8825 es el driver encargado de gestionar el movimiento del eje Z. Este componente recibe las señales de dirección (Z-DIR) y de pasos (Z-STEP) desde la placa RAMPS, y las convierte en impulsos eléctricos que controlan el motor paso a paso del eje Z. El driver también permite configurar los micro-pasos mediante los pines MS1, MS2, y MS3, lo que garantiza un control preciso del movimiento vertical.
- ✓ **Motores Paso a Paso:** es utilizado para el eje Z es un NEMA17, con una corriente nominal de 1.7A. Este motor se encarga de mover el cabezal o la plataforma de trabajo en la dirección vertical, permitiendo ajustes de altura precisos durante las operaciones de la máquina. Este nivel de control es crucial para aplicaciones como la impresión 3D y el corte láser, donde las tolerancias y ajustes verticales son críticos para la precisión y calidad del trabajo.
- ✓ **Finales de Carrera:** se integran dos finales de carrera (Z-SS1 y Z-SS2) para limitar el movimiento vertical del eje Z. Estos dispositivos actúan como interruptores de seguridad, asegurando que el cabezal no supere los límites preestablecidos de recorrido. Al detectar el límite de movimiento, los finales de carrera envían una señal al controlador para detener el motor, protegiendo los componentes mecánicos y asegurando la seguridad operativa.
- ✓ **Configuración de Micro-pasos:** el driver DRV8825 también permite la configuración de micro-pasos en el eje Z, lo que es esencial para lograr movimientos verticales de alta precisión. La

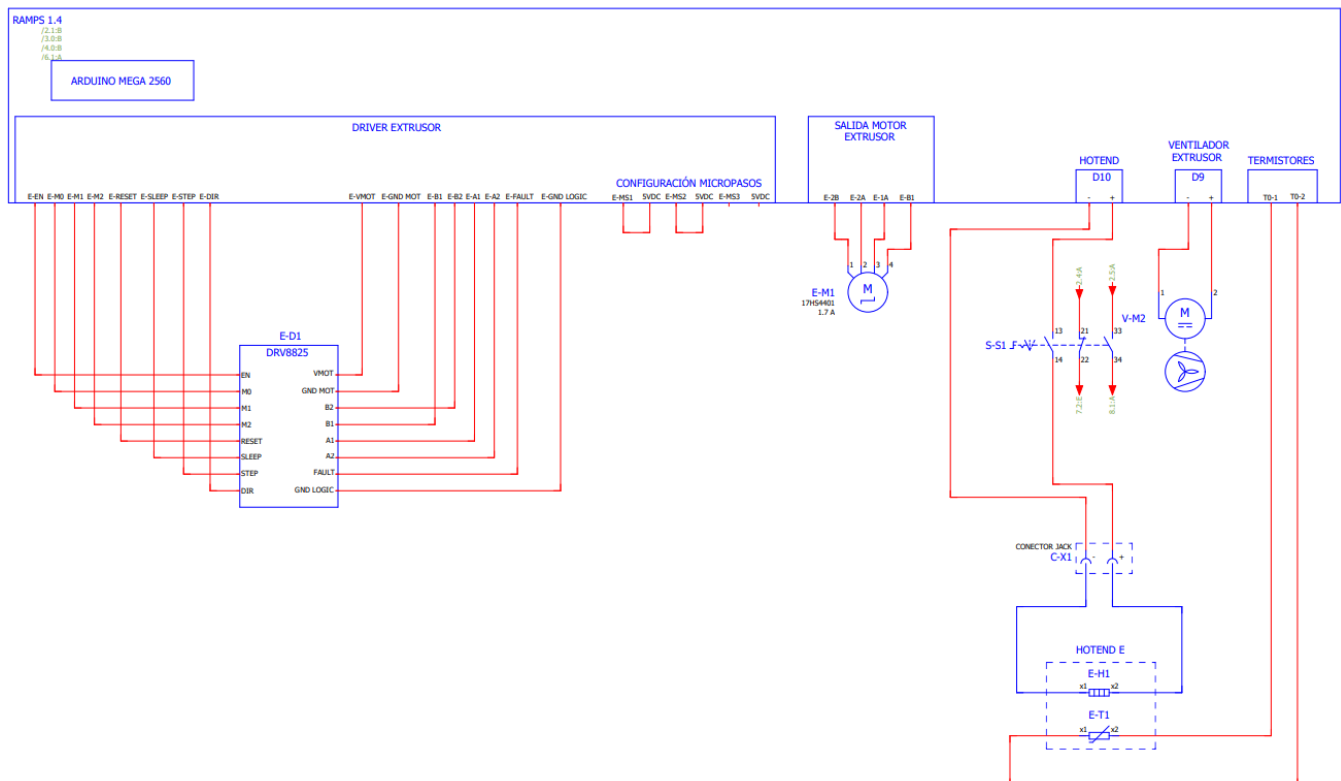
configuración de los micro-pasos se realiza mediante los pines dedicados MS1, MS2, y MS3, y permite ajustar la resolución de los pasos del motor, facilitando un control más detallado del desplazamiento vertical.

- ✓ Salida de Motores del Eje Z: el sistema de control del eje Z cuenta con una salida dedicada para los motores paso a paso (Z-M1), que proporciona la corriente y el voltaje necesarios para el funcionamiento adecuado del motor. Esta salida garantiza que el motor reciba suficiente potencia para mover el cabezal de la máquina a lo largo del eje Z sin fallos ni interrupciones.
- ✓ Seguridad: en el sistema del eje Z está garantizada por la implementación de los finales de carrera, que evitan sobrecargas mecánicas o errores de posicionamiento. Además, el uso de micro-pasos asegura un movimiento controlado y suave, evitando fallos en los procesos de mecanizado o impresión 3D, que requieren ajustes precisos en el eje Z.

## 6.7. HERRAMIENTAS

- 1) El diagrama eléctrico del extrusor describe el sistema de control y conexión para el extrusor de una impresora 3D controlada por una placa Arduino Mega 2560 con una RAMPS 1.4.

Ilustración 38. Diagrama eléctrico del extrusor



Fuente. Autores.

Se explicará los principales componentes y su función en el circuito:

- ✓ **Arduino Mega 2560:** Es el controlador principal que se encarga de gestionar los comandos de impresión, controlar los motores y manejar la comunicación con el software de la impresora 3D.

Microcontrolador: ATmega2560

Voltaje de funcionamiento: 5V

Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V

Número de pines digitales: 54 (15 de los cuales proporcionan salida PWM)

Número de entradas analógicas: 16

Memoria Flash: 256 KB

- RAMPS 1.4: Esta placa actúa como una shield para la Arduino Mega, permitiendo controlar los motores paso a paso, los calentadores, los ventiladores y los sensores de la impresora 3D.
  - ✓ Compatibilidad: Se utiliza en combinación con Arduino Mega 2560.
  - ✓ Control de ejes: Puede controlar hasta 5 motores paso a paso (X, Y, Z, extrusor 1, extrusor 2).
  - ✓ Voltaje de entrada: 12V o 24V (dependiendo de la configuración de la impresora).
  - ✓ Protección: Fusibles reemplazables para protección de sobre corriente.
- ✓ Driver del Extrusor: Este módulo es responsable de controlar el motor paso a paso del extrusor, lo que permite mover el filamento a través de la boquilla caliente. Utiliza señales de control desde la RAMPS y el Arduino.
  - ✓ Corriente máxima de salida: 1.5A por fase (ajustable con potenciómetro).
  - ✓ Micro-stepping: Permite configuraciones de micro-pasos para mejorar la resolución del motor (configuración en la RAMPS).
  - ✓ Protección térmica: Protección contra sobrecalentamiento.
- ✓ Configuración de Micro-pasos: Esta configuración permite establecer la resolución con la que el motor paso a paso mueve el extrusor, lo que afecta la precisión con la que se extruye el filamento.
- ✓ Motor del Extrusor: Es un motor paso a paso que empuja el filamento a través del hotend. En el diagrama está etiquetado como "EM1" y parece consumir 1.7A de corriente.
  - ✓ Corriente nominal: 1.7A
  - ✓ Número de pasos: Generalmente, los motores utilizados en impresoras 3D son de

200 pasos por revolución (1.8° por paso).

- ✓ Voltaje: 12V.
- ✓ Hotend: Es la parte de la impresora que calienta y funde el filamento. El circuito del hotend incluye un sensor de temperatura (termistor) que se conecta a la RAMPS, y un ventilador para enfriar el extremo del extrusor.
  - ✓ Temperatura máxima: Alrededor de 250°C para filamentos comunes (PLA, ABS).
  - ✓ Sensor de temperatura: Termistor de 100K ohmios.
  - ✓ Elementos calefactores: Generalmente, un cartucho calefactor de 12V o 24V con una potencia de entre 40W y 60W.
- ✓ Ventilador y Termistores: Los ventiladores ayudan a mantener el extrusor frío, mientras que los termistores proporcionan mediciones de temperatura al Arduino, que ajusta la potencia del calentador para mantener la temperatura adecuada.
  - ✓ Voltaje de funcionamiento: 12V o 24V.
  - ✓ Función: Enfriar la parte superior del hotend para evitar el sobrecalentamiento del extrusor y mantener una temperatura adecuada en el filamento.
  - ✓ Resistencia: 100K ohmios.
  - ✓ Función: Medición precisa de la temperatura en el hotend para retroalimentar el sistema de control y mantener la temperatura del extrusor.

Este esquema es común en impresoras 3D de código abierto, donde el Arduino Mega 2560 junto con la RAMPS 1.4 se utilizan ampliamente por su flexibilidad y capacidad de control.

Adicional se tiene de un sistema de control del Heat Bed en el diseño del sistema eléctrico de la máquina multifuncional, se ha implementado un esquema de control para la cama caliente (heat bed),



A continuación, se describe en detalle el funcionamiento y la configuración del circuito:

La cama caliente, referida en el esquema como Heat Bed B, está compuesta por dos elementos principales: el circuito de calefacción (B-H1) y el sensor de temperatura (B-T1). El circuito de calefacción recibe la potencia necesaria para su operación a través de un módulo MOSFET HA210N06, que actúa como interruptor de control de corriente. Este módulo es el encargado de regular la energía que llega a la cama caliente, permitiendo un control preciso de su temperatura.

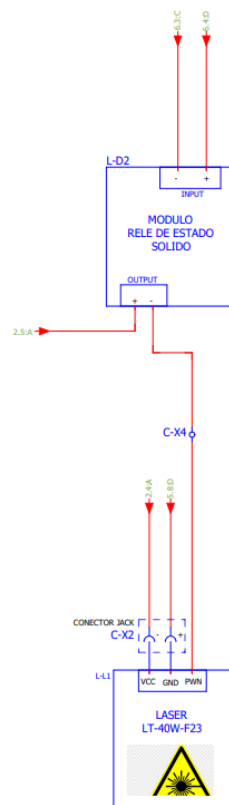
El MOSFET recibe una señal de control desde el pin D8 de la placa RAMPS 1.4, la cual se encarga de encender o apagar el módulo según los requerimientos de temperatura programados en el sistema. Para asegurar una operación segura y eficiente, el módulo MOSFET cuenta con entradas de control y alimentación de potencia etiquetadas como Control IN y HOT BED, respectivamente. Estas entradas se conectan a los terminales de la cama caliente (B-H1) para activar el circuito de calefacción.

La temperatura de la cama caliente es monitorizada en tiempo real mediante un sensor de temperatura (probablemente un termistor), que está conectado a la RAMPS a través de los terminales de entrada T1:1 y T1:2. Este sensor proporciona datos precisos al Arduino Mega 2560, permitiendo que el sistema ajuste la potencia suministrada al heat bed de manera automática, manteniendo la temperatura deseada según el proceso de fabricación en curso (impresión 3D, corte láser o mecanizado de PCB).

Este diseño asegura un control preciso de la temperatura de la cama caliente, lo que es fundamental para garantizar la calidad de los procesos de fabricación que involucran cambios de temperatura, como la impresión 3D, donde una cama caliente bien regulada es esencial para la adhesión correcta del material y la precisión dimensional del producto final.

- 2) El sistema de corte láser implementado en este proyecto utiliza un módulo láser modelo LT-40W-F23, cuya potencia nominal se estima en 40W basándose en su designación. Este módulo está integrado en un circuito de control que optimiza su funcionamiento y seguridad operativa.

Ilustración 40. Diagrama eléctrico del láser.



Fuente. Autores.

Se explican los componentes principales:

Módulo Láser LT-40W-F23:

- ✓ Interfaz de conexión: Conector tipo jack (C-X2)
- ✓ Pines de operación: VCC (alimentación), GND (tierra), PWM (control de potencia)

Circuito de Control:

- ✓ Módulo Relé de Estado Sólido (L-D2):

- ✓ Proporciona control preciso y conmutación rápida del láser.
- ✓ Cuenta con entradas de control (INPUT) y una salida (OUTPUT) hacia el láser.

Conexiones:

- ✓ La salida del relé de estado sólido se conecta al pin PWM del láser mediante el conector C-X4.
- ✓ La alimentación (VCC y GND) se suministra directamente desde la fuente de potencia al módulo láser.

Características operativas inferidas:

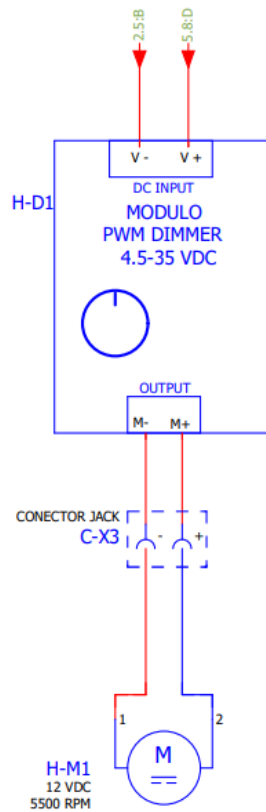
- ✓ Control de potencia: Modulación por ancho de pulso (PWM), permitiendo un ajuste fino de la intensidad del láser.
- ✓ Aplicaciones potenciales: Corte y grabado de materiales como madera, acrílico y potencialmente metales delgados, sujeto a confirmación basada en la longitud de onda específica del láser.

Consideraciones de seguridad:

- ✓ El diagrama incluye simbología de advertencia láser, indicando la necesidad de implementar medidas de seguridad apropiadas durante su operación, teniendo el cuidado que amerita la operación.

3) En el marco del proyecto, se ha diseñado e implementado un sistema de control avanzado para el husillo, componente crítico en las operaciones de mecanizado de precisión. Este sistema integra tecnología de modulación por ancho de pulso (PWM) con un motor de alta velocidad, permitiendo un control preciso y flexible en la operación de corte.

Ilustración 41. Diagrama eléctrico del husillo.



Fuente. Autores.

El sistema de control del husillo consta de los siguientes componentes principales:

Módulo PWM Dimmer (H-D1):

- ✓ Rango de voltaje de entrada: 4.5-35 VDC
- ✓ Entradas: V- (negativo) y V+ (positivo) para la alimentación DC
- ✓ Salidas: M- y M+ para el control del motor
- ✓ Característica: Incorpora un potenciómetro para el ajuste manual de la velocidad

Motor del Husillo (H-M1):

- ✓ Voltaje nominal: 12 VDC
- ✓ Velocidad máxima: 5500 RPM
- ✓ Conexión: Mediante conector jack (C-X3)

#### Circuito de Alimentación:

- ✓ La entrada de alimentación al módulo PWM Dimmer se realiza a través de los pines V- y V+
- ✓ El voltaje de alimentación se sitúa en el rango de 4.5 a 35 VDC, siendo 5.8V el valor indicado en el diagrama

#### Circuito de Control:

- ✓ La salida del módulo PWM Dimmer (M- y M+) se conecta directamente al motor del husillo a través del conector jack C-X3

#### Características operativas:

- ✓ Control de velocidad: El sistema utiliza modulación por ancho de pulso (PWM) para regular la velocidad del husillo, permitiendo un ajuste preciso desde 0 hasta la velocidad máxima de 5500 RPM.
- ✓ Flexibilidad de alimentación: El amplio rango de voltaje de entrada del módulo PWM Dimmer (4.5-35 VDC) proporciona versatilidad en la selección de la fuente de alimentación.
- ✓ Ajuste manual: La presencia de un potenciómetro en el módulo PWM Dimmer permite el ajuste fino de la velocidad del husillo directamente desde el hardware.

Este sistema de control del husillo está diseñado para ofrecer una regulación precisa de la velocidad, crucial para diversas aplicaciones de mecanizado y fabricación. La combinación de un motor de alta velocidad con un control PWM ajustable proporciona la flexibilidad necesaria para adaptarse a diferentes requisitos de mecanizado, desde operaciones de desbaste hasta acabados de precisión.

## 6.8. TORQUE

El motor paso a paso usado tiene la característica de dar 200 pasos por revolución lo que corresponde a  $1.8^\circ$ . Sin embargo, los drivers drv8825 permiten un máximo de 32 micro-pasos. Para esta demostración utilizaremos la configuración de 8 micro-pasos, por lo tanto, la cantidad de grados por paso es la siguiente:

$$1 \text{ paso} = \frac{360^\circ}{200} * \frac{1}{8} = 0.225^\circ \quad (1)$$

En cuanto a los pasos por revolución sería igual a:

$$\frac{n \text{ pasos}}{rev} = 200 * 8 = 1600 \text{ pasos} \quad (2)$$

Avance por paso:

$$\text{Avance por paso} = \frac{\text{avance tornillo}}{\frac{n \text{ pasos}}{rev}} = 1600 \text{ pasos} \quad (3)$$

Remplazando los valores en (3):

$$\text{Avance por paso} = \frac{0.008m}{1600 \frac{\text{pasos}}{rev}} \quad (4)$$

$$\text{Avance por paso} = 5 \times 10^{-6} \frac{m}{\text{paso}} = \frac{0.005mm}{\text{paso}} \quad (5)$$

Cálculo de Empuje y torque para eje X:

- Inicialmente necesitamos de definir las siguientes constantes:
- Coeficiente de fricción entre la varilla roscada y la tuerca ( $f_s$ ): 0.19
- Coeficiente de fricción entre el rodamiento lineal y el eje ( $f_b$ ): 0.01
- Angulo de la hélice de la varilla roscada, el cual calcularemos según la siguiente expresión:

$$\tan \alpha = \frac{l}{\pi * d} \quad (6)$$

Donde en (6) es:

- $\alpha$  es ángulo de la hélice del tornillo
- $l$  es el avance del tornillo
- $d$  es el diámetro del tornillo
- De esta manera tenemos que:

$$\tan \alpha = \frac{8\text{mm}}{\pi * 8\text{mm}} \quad (7)$$

Así que:

$$\alpha = 17.65^\circ \quad (8)$$

Cálculo de la carga para el eje X:

La aceleración  $a$  es igual a  $40 \text{ mm/s}^2$ , este valor lo tomamos la aceleración configurada en el software marlin.

$$a = \frac{40 \text{ mm}}{\text{s}^2} = \frac{0.04 \text{ m}}{\text{s}^2} \quad (7)$$

La fuerza requerida para mover el eje X, según la segunda ley de newton, es igual a:

$$F_{mx} = m_x * a \quad (8)$$

Si la masa, obtenida según la estimación de SolidWorks:

$$F_{mx} = 9.8 \text{ kg} * \frac{0.04 \text{ m}}{\text{s}^2} \quad (9)$$

$$F_{mx} = 0.392\text{N} \quad (10)$$

Ahora hemos calcula la fuerza para mover la masa del ensamblaje para el eje X, pero no hemos tenido en cuenta la fricción, primero calcularemos la fricción entre la varilla roscada y la tuerca ( $F_{fs}$ ). Luego, calcularemos la fuerza de fricción entre los ejes y el rodamiento lineal ( $F_{fb}$ )

Fuerza de fricción  $F_{fs}$  para una sola tuerca:

$$F_{fsx} = f_s * F_{mx} \quad (11)$$

Reemplazando los valores en (11):

$$F_{fsx} = 0.19 * 0.392 N \quad (12)$$

$$F_{fsx} = 0.07448N \quad (13)$$

Fuerza de fricción  $F_{fb}$  para un solo rodamiento:

$$F_{fbx} = f_b * F_{mx} \quad (14)$$

Reemplazando los valores en 14):

$$F_{fbx} = 0.01 * 0.392N \quad (15)$$

$$F_{fbx} = 0.00392N \quad (16)$$

Ahora la fuerza total para el eje X es la siguiente:

$$F_x = F_m + n_s * F_{fs} + n_b * F_{fb} \quad (17)$$

Donde:

- $n_s$  es el número de tuercas
- $n_b$  es el número de rodamientos

$$F_x = 0.392N + 2 * 0.07448N + 4 * 0.00392N \quad (18)$$

$$F_x = 0.5566N \quad (19)$$

$$F_x = Empuje_x \quad (20)$$

Angulo de la fricción  $\phi$ :

$$f_s = \tan \phi \quad (21)$$

$$\phi = 10.76 \quad (22)$$

$$Eficiencia\ Tornillo = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \phi)} * 100 \quad (23)$$

$$Eficiencia\ Tornillo = \frac{\tan 17.65}{\tan(17.65 + 10.76)} * 100 \quad (24)$$

Desarrollando (24):

$$Eficiencia\ Tornillo = 0.588 \quad (25)$$

Se tiene la ecuación de torque:

$$Torque = \frac{Empuje * Avance\ del\ tornillo}{2\pi * Eficiencia\ Tornillo} * 100 \quad (26)$$

Reemplazando los valores en (26):

$$Torque = \frac{0.5566N * 0.008m}{2\pi * 0.588} \quad (27)$$

$$Torque = 0.001205\ Nm \quad (28)$$

Cálculo de Empuje y torque para eje Y:

Inicialmente necesitamos de definir las siguientes constantes:

- Coeficiente de fricción entre la varilla roscada y la tuerca ( $f_s$ ): 0.19
- Coeficiente de fricción entre el rodamiento lineal y el eje ( $f_b$ ): 0.01
- Angulo de la hélice de la varilla roscada, el cual calcularemos según la siguiente expresión:

$$\tan \alpha = \frac{l}{\pi * d} \quad (29)$$

Donde:

- $\alpha$  es ángulo de la hélice del tornillo
- $l$  es el avance del tornillo
- $d$  es el diámetro del tornillo
- De esta manera tenemos que:

$$\tan \alpha = \frac{8mm}{\pi * 8mm} \quad (30)$$

Así que:

$$\alpha = 17.65^\circ \quad (31)$$

Cálculo de la carga para el eje y:

La aceleración  $a$  es igual a  $40 \text{ mm/s}^2$ , este valor lo tomamos la aceleración configurada en el software marlin.

$$a = \frac{40 \text{ mm}}{\text{s}^2} = \frac{0.04 \text{ m}}{\text{s}^2} \quad (32)$$

La fuerza requerida para mover el eje Y, según la segunda ley de newton, es igual a:

$$F_{my} = m_y * a \quad (33)$$

Si la masa, obtenida según la estimación de SolidWorks:

$$F_{my} = 5.2 \text{ kg} * \frac{0.04 \text{ m}}{\text{s}^2} \quad (34)$$

$$F_{my} = 0.208 \text{ N} \quad (35)$$

Ahora hemos calcula la fuerza para mover la masa del ensamblaje para el eje Y, pero no hemos tenido en cuenta la fricción, primero calcularemos la fricción entre la varilla roscada y la tuerca ( $F_{fs}$ ).

Luego, calcularemos la fuerza de fricción entre los ejes y el rodamiento lineal ( $F_{fb}$ )

Fuerza de fricción  $F_{fs}$  para una sola tuerca:

$$F_{fsy} = f_s * F_{my} \quad (36)$$

Reemplazando los valores en (36):

$$F_{fsy} = 0.19 * 0.208 \text{ N} \quad (37)$$

$$F_{fsy} = 0.03952 \text{ N} \quad (38)$$

Fuerza de fricción  $F_{fb}$  para un solo rodamiento:

$$F_{fby} = f_b * F_{my} \quad (39)$$

Reemplazando los valores de (39):

$$F_{fby} = 0.01 * 0.208 \text{ N} \quad (40)$$

$$F_{fby} = 0.00208N \quad (41)$$

Ahora la fuerza total para el eje Y es la siguiente:

$$F_Y = F_m + n_s * F_{fs} + n_b * F_{fb} \quad (42)$$

Donde:

- $n_s$  es el número de tuercas
- $n_b$  es el número de rodamientos

$$F_Y = 0.208N + 1 * 0.03952N + 4 * 0.00208N \quad (43)$$

$$F_Y = 0.25584N \quad (44)$$

$$F_Y = \text{Empuje}_Y \quad (45)$$

Angulo de la fricción  $\phi$ :

$$f_s = \tan \phi \quad (46)$$

$$\phi = 10.76 \quad (47)$$

$$\text{Eficiencia Tornillo} = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \phi)} * 100 \quad (48)$$

$$\text{Eficiencia Tornillo} = \frac{\tan 17.65}{\tan(17.65 + 10.76)} * 100 \quad (49)$$

Desarrollando (49):

$$\text{Eficiencia Tornillo} = 0.588 \quad (50)$$

Se tiene la ecuación de torque:

$$\text{Torque} = \frac{\text{Empuje} * \text{Avance del tornillo}}{2\pi * \text{Eficiencia Tornillo}} * 100 \quad (51)$$

$$\text{Torque} = \frac{0.25584N * 0.008m}{2\pi * 0.588} \quad (52)$$

Desarrollando (52):

$$\text{Torque} = 0.000553 Nm \quad (53)$$

Cálculo de Empuje y torque para eje Z:

Inicialmente necesitamos de definir las siguientes constantes:

- Coeficiente de fricción entre la varilla roscada y la tuerca ( $f_s$ ): 0.19
- Coeficiente de fricción entre el rodamiento lineal y el eje ( $f_b$ ): 0.01
- Angulo de la hélice de la varilla roscada, el cual calcularemos según la siguiente expresión:

$$\tan \alpha = \frac{l}{\pi * d} \quad (54)$$

Donde:

- $\alpha$  es ángulo de la hélice del tornillo
- $l$  es el avance del tornillo
- $d$  es el diámetro del tornillo
- De esta manera tenemos que:

$$\tan \alpha = \frac{8\text{mm}}{\pi * 8\text{mm}} \quad (55)$$

Así que:

$$\alpha = 17.65^\circ \quad (56)$$

Cálculo de la carga para el eje Z:

La aceleración  $a$  es igual a  $40 \text{ mm/s}^2$ , este valor lo tomamos la aceleración configurada en el software marlin.

$$a = \frac{40 \text{ mm}}{\text{s}^2} = \frac{0.04 \text{ m}}{\text{s}^2} \quad (57)$$

La fuerza requerida para mover el eje Z, según la segunda ley de newton, es igual a:

$$F_{my} = m_y * a \quad (58)$$

Si la masa, obtenida según la estimación de SolidWorks:

$$F_{my} = 3.1 \text{ kg} * \frac{0.04 \text{ m}}{s^2} \quad (59)$$

$$F_{my} = 0.124N \quad (60)$$

Ahora hemos calcula la fuerza para mover la masa del ensamblaje para la porta herramienta junto con la herramienta, pero no hemos tenido en cuenta la fricción, primero calcularemos la fricción entre la varilla roscada y la tuerca ( $F_{fs}$ ). Luego, calcularemos la fuerza de fricción entre los ejes y el rodamiento lineal ( $F_{fb}$ )

Fuerza de fricción  $F_{fs}$  para una sola tuerca:

$$F_{fsz} = f_s * F_{mz} \quad (61)$$

$$F_{fsz} = 0.19 * 0.124 N \quad (62)$$

$$F_{fsy} = 0.02356N \quad (63)$$

Fuerza de fricción  $F_{fb}$  para un solo rodamiento:

$$F_{fbz} = f_b * F_{mz} \quad (64)$$

$$F_{fbz} = 0.01 * 0.124N \quad (65)$$

$$F_{fbz} = 0.00124N \quad (66)$$

Ahora la fuerza total para el eje Z es la siguiente:

$$F_z = F_m + n_s * F_{fs} + n_b * F_{fb} \quad (67)$$

Donde:

- $n_s$  es el número de tuercas
- $n_b$  es el número de rodamientos

$$F_z = 0.124N + 1 * 0.02356N + 4 * 0.00124N \quad (68)$$

Desarrollando (68):

$$F_z = 0.1761N \quad (69)$$

$$F_z = \text{Empuje}_z \quad (70)$$

Angulo de la fricción  $\phi$ :

$$f_s = \tan \phi \quad (71)$$

$$\phi = 10.76 \quad (72)$$

$$\text{Eficiencia Tornillo} = \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \phi)} * 100 \quad (73)$$

Remplazando los valores en (73):

$$\text{Eficiencia Tornillo} = \frac{\tan 17.65}{\tan(17.65 + 10.76)} * 100 \quad (74)$$

$$\text{Eficiencia Tornillo} = 0.588 \quad (75)$$

$$\text{Torque} = \frac{\text{Empuje} * \text{Avance del tornillo}}{2\pi * \text{Eficiencia Tornillo}} * 100 \quad (76)$$

$$\text{Torque} = \frac{0.1761N * 0.008m}{2\pi * 0.588} \quad (77)$$

Desarrollando (77)

$$\text{Torque} = 0.0003813 Nm \quad (78)$$

## 6.9. SELECCIÓN DEL MOTOR

A continuación, se presenta una tabla que describe las características de los movimientos y el torque requerido para los ejes X, Y y Z en el sistema propuesto. Se resalta que el motor paso a paso 17HS4401 fue seleccionado debido a su amplio uso en aplicaciones de precisión como impresoras 3D y sistemas CNC, y por contar con un torque considerablemente superior al necesario. El análisis del torque máximo requerido por motor revela que el torque disponible del motor seleccionado supera ampliamente los valores calculados para cada uno de los ejes, ofreciendo un factor de seguridad alto ( $FS \approx 36.5$ ). Esto garantiza un desempeño eficiente y confiable en el control de los movimientos, incluso bajo condiciones exigentes, al permitir que el motor opere sin acercarse a sus límites de capacidad

Tabla 6. Características de los movimientos y el torque de los ejes.

<b>Movimiento</b>	<b>Torque por Movimiento (Nm)</b>	<b>Cantidad de Motores</b>	<b>Torque por motor (Nm)</b>
<b>X</b>	0.001205	2	0.0006025
<b>Y</b>	0.000553	1	0.000553
<b>Z</b>	0.0003813	1	0.0003813

Fuente. Autores.

1. Para el torque máximo requerido por motor (movimiento X):

$$\tau_{Max} = 0.0006025 \text{ Nm} \quad (79)$$

2. Para la comparación con el torque del motor seleccionado:

$$\tau_{motor} = 0.022 \text{ Nm} > \tau_{max} = 0.0006025 \text{ Nm} \quad (80)$$

3. Para el factor de seguridad (cuántas veces más potente es el motor seleccionado):

$$FS = \frac{\tau_{motor}}{\tau_{Max}} \approx 36.5 \quad (81)$$

Donde:

$\tau_{max}$  = Torque máximo requerido por motor

$\tau_{motor}$  = Torque máximo del motor seleccionado

$FS$  = Factor de seguridad

El motor 17HS4401 con un torque máximo de 0.022 Nm es más que suficiente para cubrir los requerimientos de torque en todos los movimientos. De hecho, tiene un margen considerable:

- Es aproximadamente 36.5 veces más potente que el requerimiento más exigente (0.022 / 0.0006025  $\approx$  36.5)
- Puede manejar fácilmente cualquiera de los movimientos individuales (X, Y, o Z) sin problemas.

El Motor 17HS4401, el cual fue preseleccionado por su fácil acceso comercial, tiene un torque máximo de 0.022 Nm, el cual es superior a cuál quiera de los anteriores torques por motor que se calculó para mover cada uno de los movimientos.

*Ilustración 42. Motor 17HS4401.*



*Fuente.* (Electronicas AFG, 2024).

El 17HS4401 es un motor paso a paso tipo NEMA 17, comúnmente utilizado en aplicaciones como impresoras 3D, CNC y robots debido a su precisión y control de movimiento. A continuación, se detallan sus principales especificaciones:

- Modelo: 17HS4401
- Tipo de motor: Motor paso a paso NEMA 17
- Ángulo de paso:  $1.8^\circ$  por paso (200 pasos por revolución)
- Tensión nominal: 3.2 V
- Corriente nominal: 1.7 A por fase
- Par de torsión: Aproximadamente 40 N·cm (Newton centímetro) o 0.4 N·m (Newton metro)
- Resistencia por fase: 1.9 ohmios
- Inductancia por fase: 3.2 mH
- Número de cables: 4 cables (bipolar)
- Longitud del motor: 40 mm
- Diámetro del eje: 5 mm
- Peso: Aproximadamente 280 g

Costo promedio de mercado: el precio de este motor puede variar dependiendo del proveedor y la región. Sin embargo, en el mercado global, el costo promedio oscila entre \$10 a \$20 USD por unidad. En Colombia, dependiendo de los impuestos y la disponibilidad, este costo puede estar ligeramente por encima, entre \$40,000 y \$80,000 COP.

## 6.10. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para calcular la corriente necesaria que debe suministrarse a la máquina multifuncional, es imprescindible definir los componentes que consumirán potencia eléctrica. Aunque los motores paso a paso 17HS4401 tienen un consumo nominal de 1.7 A, este valor no se considerará directamente. En su lugar, se tomarán en cuenta los valores correspondientes al controlador DRV8825, ya que dicho controlador regula la corriente suministrada al motor, y su capacidad máxima de manejo de corriente es superior a la del motor. Aclarado este punto, los componentes que contribuyen al consumo de potencia se resumen en la tabla correspondiente.

Tabla 7. Requerimientos de la fuente de alimentación.

<b>Tipo</b>	<b>Elemento</b>	<b>Corriente por elemento (A)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Corriente Total(A)</b>
<b>Movimientos</b>	Driver drv8825	2.4	3	7.2
<b>Control</b>	Arduino Mega 2560	0.25	1	0.25
<b>Control</b>	Ventilador	0.4	1	0.4
<b>Impresión</b>	Driver drv8825	2.4	1	2.4
<b>3D</b>	Hotend MK8	3.4	1	3.4
	Ventilador	0.2	1	0.2
	Hotbed E12-12V-V1.01	10	1	10
<b>Motor tool</b>	Motor DC 12V 5500 rpm	5	1	5
<b>Laser</b>	Laser	1.7	1	1.7
			<b>Total</b>	<b>30.55</b>

*Fuente. Autores.*

El consumo total estimado para la máquina multifuncional es de 30.55 A. Sin embargo, es importante señalar que las distintas herramientas no operarán de manera simultánea, dado que la máquina está diseñada para ejecutar una función a la vez. La función que presenta el mayor consumo es la impresión 3D, con una demanda de 16 A. En consecuencia, se excluyen los consumos correspondientes al motor de herramientas y al láser, lo que reduce la corriente total necesaria a 23.85 A. Este valor representa la corriente mínima requerida para el correcto funcionamiento de la máquina.

Adicionalmente, es necesario aplicar un factor de seguridad. Para este caso, se ha determinado un factor del 25%, lo que ajusta el requerimiento de corriente total a 29.81 A. Con el fin de garantizar la adecuada operación de la máquina, y previendo la futura integración de nuevos componentes, se ha seleccionado la fuente de alimentación S-480-12, la cual ofrece una capacidad de 40 A. Esta selección proporciona un margen de seguridad adicional, permitiendo una mayor flexibilidad y expansión del sistema en el futuro.

*Ilustración 43. Fuente de alimentación S-480-12.*



*Fuente. (Electronicas AFG, 2024).*

La fuente de alimentación S-480-12 es un dispositivo conmutado de voltaje regulado, diseñada para suministrar corriente estable a dispositivos que requieren una fuente de energía confiable, como máquinas CNC, impresoras 3D, y otros equipos industriales. A continuación, se detallan sus especificaciones más importantes:

- Modelo: S-480-12
- Tipo: Fuente de alimentación conmutada

Entrada de corriente:

- Voltaje: 88-264 VAC (voltaje universal)
- Frecuencia: 47-63 Hz
- Entrada de corriente DC: 124-370 VDC

Salida de corriente:

- Voltaje de salida: 12 VDC
- Corriente de salida: 40 A
- Potencia nominal: 480 W
- Rango de ajuste de voltaje: 10.2 a 13.8 VDC
- Ripple y ruido: 120 mVp-p

Eficiencia: Aproximadamente 85%

Costo promedio de mercado: el precio de la fuente de alimentación S-480-12 puede variar según el proveedor y la región. En general, el costo promedio oscila entre \$30 y \$60 USD en mercados internacionales. En Colombia, debido a impuestos y costos de importación, su precio puede ubicarse entre \$150,000 y \$250,000 COP aproximadamente.

## 6.11. ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN

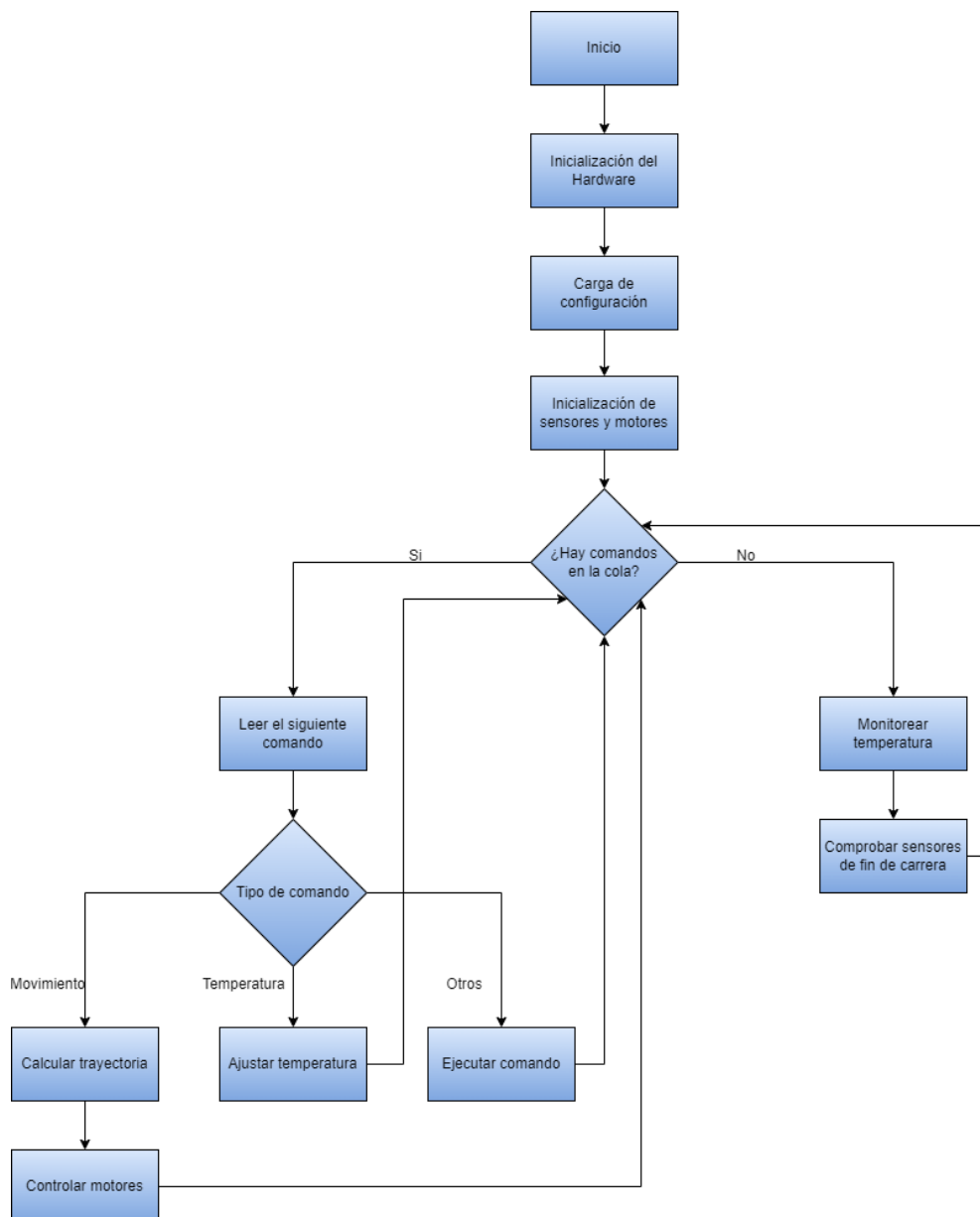
El firmware Marlin implementa un algoritmo de control robusto y eficiente para la gestión de impresoras 3D. Este algoritmo se estructura en varias fases secuenciales, seguidas de un bucle de ejecución continua. A continuación, se detalla cada fase del proceso:

1. Inicialización del sistema:
  - 1.1. Activación de la impresora: El proceso se inicia con el encendido del dispositivo.
  - 1.2. Inicialización del hardware: Se procede a la configuración inicial de todos los componentes electrónicos, incluyendo la placa controladora, los drivers de los motores paso a paso y los periféricos asociados.
  - 1.3. Carga de parámetros: El firmware carga la configuración específica de la impresora, que incluye dimensiones de la plataforma de impresión, límites de velocidad, parámetros de aceleración y otros ajustes críticos.
  - 1.4. Calibración de sensores y actuadores: Se inicializan los sensores de temperatura y de fin de carrera, y se establecen las posiciones de referencia de los motores.
2. Bucle principal de ejecución: el algoritmo entra en un ciclo continuo de operación que comprende las siguientes etapas:
  - 2.1. Verificación de cola de comandos: se examina la presencia de instrucciones G-code pendientes de ejecución.
  - 2.2. Procesamiento de comandos (si existen):
    - 2.2.1. Lectura del comando: Se extrae la siguiente instrucción G-code de la cola.
    - 2.2.2. Clasificación y ejecución del comando:
      - a) Comandos de movimiento: Se calcula la trayectoria y se controlan los motores para ejecutar el desplazamiento requerido.
      - b) Comandos de control térmico: Se ajustan las temperaturas del extrusor o de la plataforma de impresión según las especificaciones.
      - c) Otros comandos: Se ejecutan instrucciones adicionales según su naturaleza y requerimientos.
  - 2.3. Monitoreo del sistema (en ausencia de comandos):
    - 2.3.1. Control térmico: Se realiza una verificación constante de las temperaturas del extrusor y de la plataforma de impresión.
    - 2.3.2. Verificación de límites: Se monitorea el estado de los sensores de fin de carrera para prevenir

movimientos fuera del rango operativo seguro. 2.4. Retroalimentación: tras la ejecución de comandos o la realización de verificaciones, el sistema retorna al punto de inicio del bucle para reiniciar el proceso de verificación y ejecución.

Este algoritmo asegura una respuesta eficiente a las instrucciones G-code, mientras mantiene una supervisión constante de los parámetros críticos del sistema, garantizando así la precisión, la calidad y la seguridad durante todo el proceso de impresión.

Ilustración 44. Algoritmo programación Marlin.



*Fuente. Autores.*

El firmware GRBL implementa un algoritmo de control sofisticado para la gestión precisa de máquinas CNC, en este caso del láser y del husillo. Este algoritmo se estructura en fases secuenciales de inicialización, seguidas de un bucle de ejecución continua. A continuación, se detallan las etapas del proceso:

1. Inicialización del sistema:
  - 1.1. Activación del dispositivo: El proceso se inicia con el encendido de la máquina CNC.
  - 1.2. Inicialización del hardware: Se procede a la configuración inicial de todos los componentes electrónicos, incluyendo la placa controladora, los drivers de los motores paso a paso y los periféricos asociados.
  - 1.3. Carga de parámetros: El firmware carga la configuración específica de la máquina, que incluye dimensiones del área de trabajo, límites de velocidad, parámetros de aceleración y otros ajustes críticos.
  - 1.4. Calibración de motores y sensores: Se establecen las posiciones de referencia de los motores y se inicializan los sensores de posición y límite.
2. Bucle principal de ejecución: el algoritmo entra en un ciclo continuo de operación que comprende las siguientes etapas:
  - 2.1. Verificación de cola de comandos G-code: se examina la presencia de instrucciones G-code pendientes de ejecución.
  - 2.2. Procesamiento de comandos (si existen):
    - 2.2.1. Lectura del comando: Se extrae la siguiente instrucción G-code de la cola.
    - 2.2.2. Análisis y procesamiento: Se interpreta el comando para determinar la acción requerida.
    - 2.2.3. Clasificación y ejecución del comando:
      - a) Comandos de movimiento: Se calcula la trayectoria, se generan los pasos necesarios y se controlan los motores para ejecutar el desplazamiento requerido.
      - b) Comandos de configuración: Se actualizan los parámetros del sistema según las especificaciones.
      - c) Otros comandos: Se ejecutan instrucciones adicionales según su naturaleza y requerimientos.
  - 2.3. Monitoreo del sistema (en ausencia de comandos):
    - 2.3.1. Supervisión de entradas: Se realiza

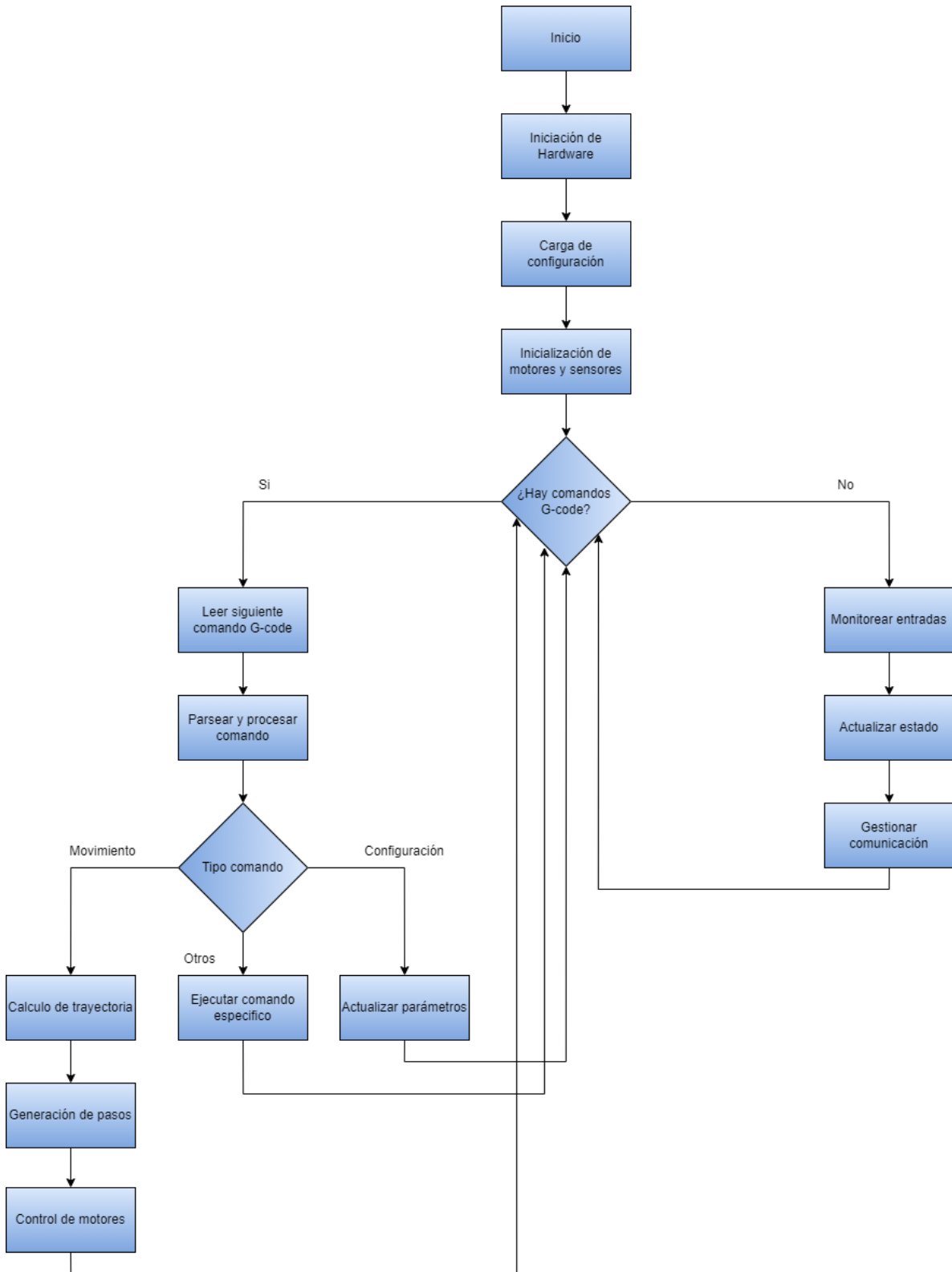
una verificación constante del estado de los sensores y conmutadores. 2.3.2. Actualización de estado: Se refresca la información del sistema, incluyendo posiciones y configuraciones actuales. 2.3.3. Gestión de comunicaciones: se mantiene un flujo de datos bidireccional con el ordenador de control. 2.4. Retroalimentación: tras la ejecución de comandos o la realización de verificaciones, el sistema retorna al punto de inicio del bucle para reiniciar el proceso de verificación y ejecución.

Este algoritmo permite a GRBL mantener un control preciso y continuo sobre todos los aspectos operativos de la máquina CNC. La estructura cíclica asegura una respuesta eficiente a las instrucciones G-code, mientras mantiene una supervisión constante de los parámetros críticos del sistema.

La implementación de este algoritmo en aplicaciones de corte láser y mecanizado de PCB proporciona:

- Alta precisión en la ejecución de trayectorias complejas.
- Optimización de la velocidad y aceleración para diferentes materiales y operaciones.
- Capacidad de respuesta inmediata a comandos de control y parada de emergencia.
- Flexibilidad para adaptarse a diversos requisitos de fabricación y prototipado.

Ilustración 45. Algoritmo programación GRBL.



Fuente. Autores

## 7. RECURSOS DISPONIBLES

En la siguiente tabla se detallan los recursos necesarios para la fabricación de la máquina multifuncional, incluyendo costos asociados al personal, software, materiales, insumos, componentes mecánicos, electrónicos y otros gastos. Estos recursos han sido clasificados para ofrecer una visión clara del presupuesto requerido para el desarrollo del proyecto, facilitando la evaluación económica y de viabilidad. Es importante señalar que, a diferencia del módulo de impresión 3D, no se incluye una sección específica para el corte láser. Esto se debe a que el láser utilizado en la máquina multifuncional no requiere complementos adicionales como soporte o estructuras especiales, lo que simplifica su integración en el diseño general.

Tabla 8. Costos de recursos para fabricar la máquina multifuncional.

Categoría	Ítem	Cantidad	Valor Unidad	Valor Total
<b>1. Personal</b>				
	Estudiante Investigador	2	\$ 1,000,000.00	\$ 2,000,000.00
	Director	1	-	-
<b>2. Software</b>				
	Código G: Repetier (Free)	1	\$ -	\$ -
	Solidworks (Licencia Estudiantil)	1	\$ -	\$ -
<b>3. Materiales e Insumos</b>				
<i>Estructurales</i>	Perfiles de 6mts de 1 pulg	1	\$ 35,000.00	\$ 35,000.00
	Perfiles de 6mts de ¾ de pulg	1	\$ 24,000.00	\$ 24,000.00

	Varilla de acero plata 6mts	1	\$	240,000.00	\$	240,000.00
	Varilla roscada trapezoidal 8mm	3	\$	44,000.00	\$	132,000.00
	– T8 – 4 Hilos					
	Varilla roscada trapezoidal 8mm	1	\$	30,000.00	\$	30,000.00
	– T8 X 300mm					
	Varilla Lisa Acero 12 mm X	3	\$	80,000.00	\$	240,000.00
	1mt					
<b>Componentes</b>	Acoples flexibles 5mmX8mm –	4	\$	10,000.00	\$	40,000.00
<b>Mecánicos</b>	CNC					
	Cojinete – Chumacera pared	4	\$	12,000.00	\$	48,000.00
	con rodamiento 8mm					
	Soportes eje lineal Shf8 – Base	8	\$	12,000.00	\$	96,000.00
	Varilla Lisa					
	Cojinete – Chumacera con	4	\$	12,000.00	\$	48,000.00
	rodamiento 8mm					
	Base varilla 8mm Sk8 – Soporte	8	\$	10,000.00	\$	80,000.00
	eje lineal 8mm					
	Soporte varilla lisa 12mm	4	\$	12,000.00	\$	48,000.00
	SK12- Base eje lineal 12mm					
	CNC					
	Rodamiento lineal 12mm	4	\$	24,000.00	\$	96,000.00
	Cerrado SCS12UU					
	Soporte eje lineal 12mm Sgf12	4	\$	14,900.00	\$	59,600.00

	Camiseta trapezoidal soporte de aluminio tuerca	4	\$	25,000.00	\$	100,000.00
	Soporte Eje Lineal 12mm Shf12	4	\$	14,900.00	\$	59,600.00
<i>Electrónica</i>	Shield RAMPS 1.4 + 5X driver 8825 para Arduino Mega	1	\$	120,000.00	\$	120,000.00
	Driver motor paso a paso Drv8825 – Para Shield CNC – 2.2 A	5	\$	18,000.00	\$	90,000.00
	Micro Sd módulo para Arduino	1	\$	9,000.00	\$	9,000.00
	Final de carrera impresora 3D CNC	8	\$	5,000.00	\$	40,000.00
	Laser tree CNC	1	\$	356,340.00	\$	356,340.00
	Mini mandril portabrocas con motor Dc - Collet Twist Drill	1	\$	172,000.00	\$	172,000.00
	Microsuiche Final de Carrera 5A 250V	8	\$	5,000.00	\$	40,000.00
	Módulo Rf Transceptor Lora Ra-02 Sx1278 10km Pcb	2	\$	52,900.00	\$	105,800.00
	Selector de 3 posiciones para tablero	2	\$	32,000.00	\$	64,000.00
	Contactos normalmente abiertos	4	\$	16,000.00	\$	64,000.00
	Contactos normalmente cerrados	3	\$	18,000.00	\$	54,000.00

	Conectores Jack	8	\$	2,500.00	\$	20,000.00
	Convertidor PWM DC	1	\$	12,000.00	\$	12,000.00
	Rele de estado sólido ssr-25 Dd 25a 5-120vdc Fotek	1	\$	52,300.00	\$	52,300.00
	Paro de emergencia con llave	1	\$	45,900.00	\$	45,900.00
	MOSFET Potencia 25a Cama Caliente	1	\$	30,000.00	\$	30,000.00
<b>Impresión</b>	Extrusor MK8 Impresora 3D	1	\$	155,000.00	\$	155,000.00
<b>3D</b>	Reprap – Hotend + Soporte					
	Plataforma de calentamiento para cama de impresora 3D 12V	1	\$	175,000.00	\$	175,000.00
	Accesorios para la instalación de cama de calentamiento (soporte)	1	\$	50,000.00	\$	50,000.00
	Kg de filamento PLA de impresora 3D	1	\$	80,000.00	\$	80,000.00
	Kg de filamento ABS de impresora 3D	1	\$	90,000.00	\$	90,000.00
<b>Otros</b>	Chatarra (Láminas y otros)	1	\$	30,000.00	\$	30,000.00
	Tornillería	1	\$	95,000.00	\$	95,000.00
	Cable	1	\$	90,000.00	\$	90,000.00
	Soporte y pie de amigos (ferretería)	1	\$	15,000.00	\$	15,000.00

Cadena porta cable 1mtr	1	\$	48,000.00	\$	48,000.00
Ledmo convertidor de conmutación adaptador de fuente de ali.	1	\$	220,000.00	\$	220,000.00
Acrílico 3mm 1000mmx500	1	\$	120,000.00	\$	120,000.00
Gafas de seguridad para luz laser pulsada	1	\$	110,000.00	\$	110,000.00
Soporte Bracket Motor Dc Serie 5	1	\$	10,000.00	\$	10,000.00
Pintura aerosol	6	\$	12,000.00	\$	72,000.00
Pliegos de Lija	3	\$	1,800.00	\$	5,400.00
Bases adhesivas	15	\$	300.00	\$	4,500.00
Bolsa de amarres plásticos	1	\$	11,900.00	\$	11,900.00
Termo encogible	1	\$	14,000.00	\$	14,000.00
Extensión USB tipo hembra	1	\$	11,500.00	\$	11,500.00
<b>4. Otros Gastos</b>					
Transportes	20	\$	7,000.00	\$	140,000.00
Libros, revistas, folletos, guías (Base de datos de la universidad)	-	\$	-	\$	-
Impresiones y fotocopias	-	\$	-	\$	-
Imprevistos	1	\$	600,000.00	\$	600,000.00

*Fuente. Autores.*

## 7.1. ANALISIS DE COSTOS

El análisis de costos busca comparar el valor de adquisición de una máquina multifuncional que integra tres tecnologías (impresión 3D, corte láser y mecanizado de PCB) con el costo de adquirir cada una de estas máquinas por separado. La Tabla 6 detalla los precios aproximados en dólares y pesos colombianos para distintos tipos de máquinas en el mercado, además de sus características principales y puntos de venta en Colombia

Tabla 9. Costos de máquinas de impresión 3D, corte láser y mecanizado PCB.

<b>Tipo de Máquina</b>	<b>Precio Promedio (USD)</b>	<b>Precio Aproximado (COP)</b>	<b>Características Principales</b>	<b>Dónde Comprar</b>	<b>Tamaño Promedio de la Bancada (mm)</b>
<b>Máquina de Impresión 3D (Talla Pequeña a Mediana)</b>	\$500 - \$5,000	2,050,000 - 20,500,000	Impresión 3D en distintos materiales como PLA, ABS, resinas.	AliExpress, Amazon, Prusa, Anycubic, <b>3D Market Colombia, Impresoras3D.com.co</b>	220 x 220 a 300 x 300
<b>Cortadora Láser (No Metales)</b>	\$3,000 - \$16,000	12,300,000 - 65,600,000	Capaz de cortar madera, acrílico, cuero, textiles	Alibaba, AliExpress, Boss Laser, Thunder Laser, <b>TechShop Bogotá, Mercadolibre Colombia</b>	400 x 600 a 1300 x 900
<b>Máquina de</b>	\$200 -	820,000 -	Creación de	AliExpress, PCBWay,	150 x 200 a

<b>Mecanizado</b>	\$4,000	16,400,000	prototipos de	Bantam Tools,	300 x 400
<b>de PCB</b>			PCB, pequeñas	<b>Ferretrónica Bogotá,</b>	
			dimensiones	<b>Mercadolibre</b>	
				<b>Colombia</b>	

*Fuente. Autores.*

Comparando el costo de la máquina multifuncional con los precios de otras máquinas dedicadas, vemos que: la máquina multifuncional tiene un costo aproximado de COP 6,798,840, lo que es competitivo si consideramos que combina tres funciones: impresión 3D, corte láser y mecanizado de PCB.

En comparación, una cortadora láser por sí sola puede costar entre COP 12,300,000 y COP 65,600,000, lo que demuestra que adquirir una cortadora láser independiente sería significativamente más caro que la máquina multifuncional.

La máquina de mecanizado de PCB cuesta entre COP 820,000 y COP 16,400,000, por lo que, si solo se requiere esa función, podría ser más barato comprarla por separado. Sin embargo, la multifuncional ofrece una mayor versatilidad a un costo similar.

Las impresoras 3D estándar tienen un rango de precios entre COP 820,000 y COP 12,300,000, lo que significa que una máquina multifuncional con capacidades adicionales (corte láser y PCB) es una opción más rentable para proyectos que requieren múltiples tecnologías.

En conclusión, la máquina multifuncional ofrece un retorno de inversión considerable al combinar varias funcionalidades a un precio menor que adquirir los equipos por separado.

- Comparativa Total: si se adquirieran cada una de estas máquinas por separado, el rango de inversión aproximada sería:

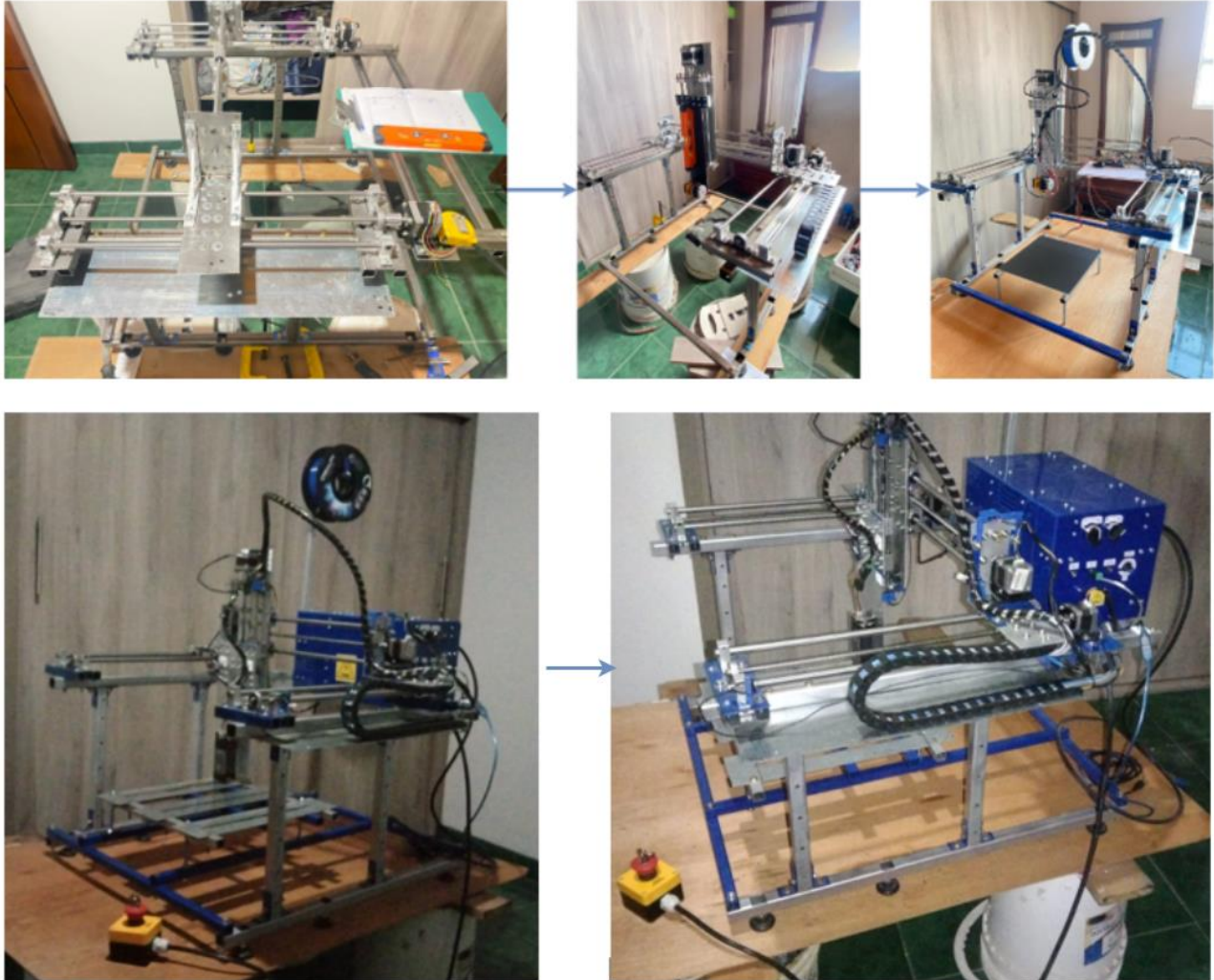
Costo mínimo: COP 15,170,000 (Impresión 3D + Cortadora Láser + Máquina PCB)

Costo máximo: COP 102,500,000

- Espacio y versatilidad: la máquina multifuncional ocupa menos espacio al integrar varias funciones en un solo equipo. Esto es una ventaja significativa en talleres pequeños o laboratorios donde el espacio es limitado.
- Costo de mantenimiento: un solo equipo multifuncional puede tener costos de mantenimiento más bajos comparado con el mantenimiento de tres máquinas diferentes.
- Funcionalidad y complejidad: aunque la máquina multifuncional es más económica, la complejidad técnica y los posibles tiempos de inactividad por fallas en uno de los módulos pueden afectar su uso si se necesita hacer reparaciones. En cambio, con máquinas individuales, los problemas en una no afectan a las demás.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

*Ilustración 46. Evolución de la construcción del prototipo de máquina multifuncional.*



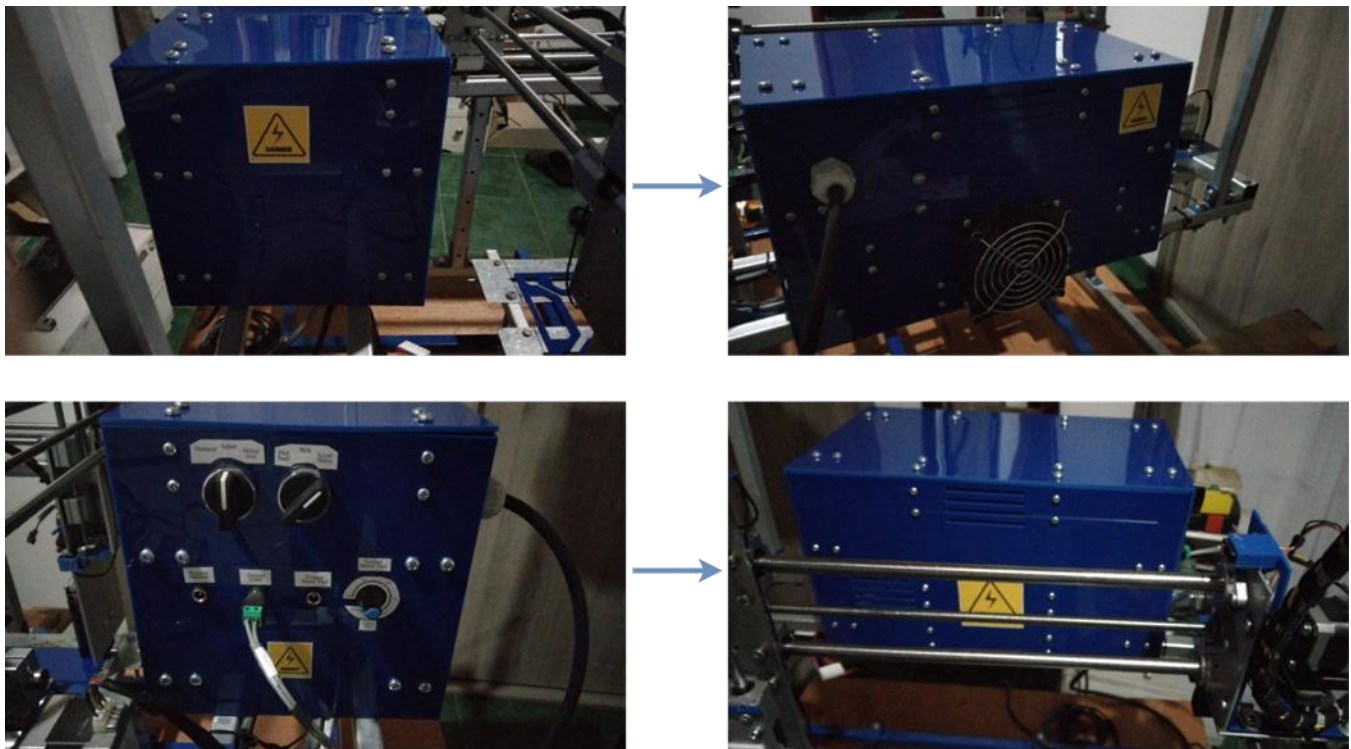
*Fuente. Autores.*

La construcción del prototipo se realizó conforme al modelo CAD previamente diseñado. Durante este proceso, se emplearon herramientas eléctricas manuales, como pulidoras y taladros, lo que presentó un desafío en cuanto a la precisión requerida para las medidas y formas necesarias en el ensamblaje de la máquina. El uso de estas herramientas manuales implicó una mayor dependencia de la habilidad y destreza del operador, lo que afectó la eficiencia y exactitud del trabajo.

Es importante señalar que la mejora de las herramientas de producción podría optimizar significativamente tanto los tiempos de trabajo como los resultados mecánicos. Por ejemplo, una cortadora hidráulica sería ideal para cortar láminas, reduciendo el tiempo de fabricación y aumentando la precisión en los cortes. Sin embargo, en este caso, las láminas tuvieron que ser cortadas manualmente utilizando una pulidora, lo que incrementó la dificultad y el tiempo del proceso.

El tiempo total invertido en la construcción del prototipo fue de aproximadamente 640 horas. No obstante, con las herramientas adecuadas, se estima que el proceso podría haberse completado en un rango de 160 a 180 horas, lo que subraya la importancia de contar con equipamiento especializado para mejorar la eficiencia y calidad en la fabricación.

*Ilustración 47. Señalización de seguridad.*



*Fuente. Autores.*

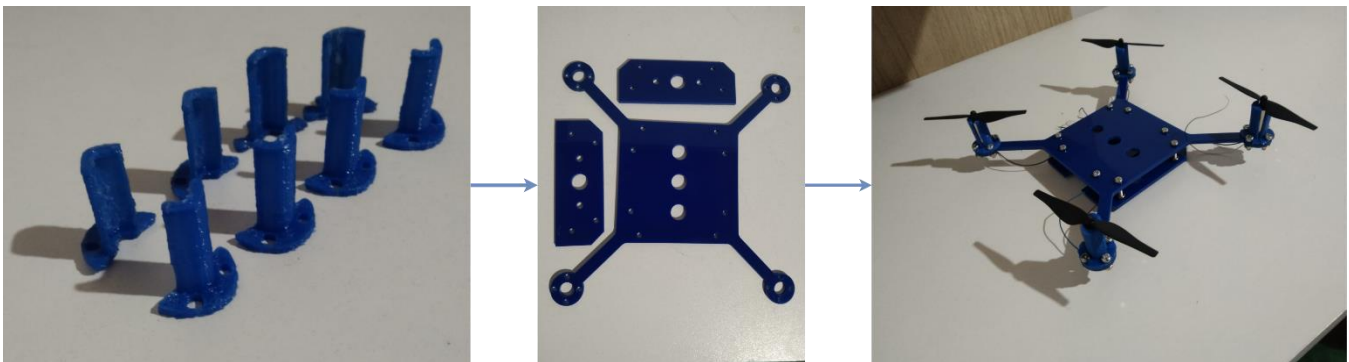
Se observa que la máquina cuenta con señalización de seguridad adecuada, destacando el uso de un símbolo triangular amarillo con un rayo negro, que sigue el estándar internacional para indicar peligro

eléctrico. Este símbolo está estratégicamente ubicado en varias zonas visibles, como el panel frontal de la carcasa azul y el panel de control donde se encuentran los interruptores.

La visibilidad de la señalización es efectiva, gracias al contraste entre el amarillo del triángulo de advertencia y el azul de la carcasa de la máquina, facilitando su rápida identificación. La advertencia se enfoca específicamente en riesgos eléctricos, lo cual es adecuado considerando que la máquina utiliza energía eléctrica, y sugiere que la señalización cumple con las normativas internacionales de seguridad. Adicionalmente, la máquina cuenta con un botón de paro de emergencia, el cual corta de manera inmediata el suministro de energía. Este botón es de desenclavamiento por llave, garantizando así que la máquina no se reinicie accidentalmente y se brinde mayor seguridad al operario.

Sin embargo, se identifican áreas de mejora. No se observan otras señales que adviertan sobre riesgos mecánicos o partes móviles, lo que sería fundamental en una máquina multifuncional. Adicionalmente, sería útil añadir etiquetas explicativas que detallen los riesgos específicos y las precauciones necesarias para el manejo seguro de la máquina, complementando así las medidas de seguridad ya implementadas.

*Ilustración 48. Productos obtenidos de la máquina multifuncional.*



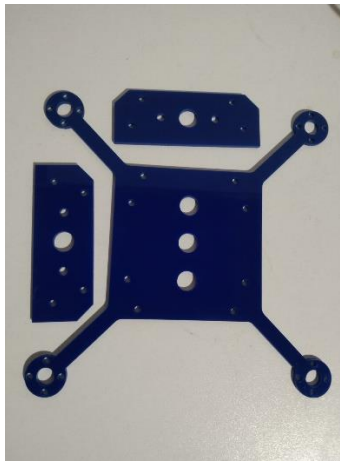
*Fuente. Autores.*

Evaluar el desempeño en términos de precisión dimensional de los productos obtenidos, análisis de costos de fabricación y velocidad de operación del prototipo, para la fabricación de piezas de drones.

Precisión dimensional:

Para evaluar el desempeño de la maquina se realizaron dos conjuntos de operaciones. El primer conjunto centra en el láser para evaluar, el uso del firmware GRBL y el comportamiento de la máquina. En el cual obtenemos, los siguientes resultados, para la función de CNC:

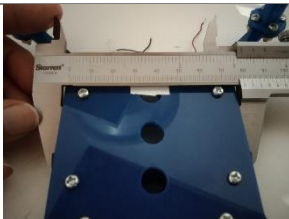
*Ilustración 49. Frame del drone obtenido por el corte láser.*

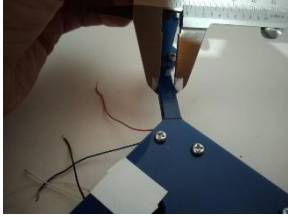



*Fuente. Autores.*

En base a estas se realizan las siguientes 3 mediciones usan un calibrador pie de rey con una precisión de 0.05 mm

*Tabla 10. Toma de datos de la precisión dimensional del corte láser.*

<b>Medida</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor diseño (mm)</b>	<b>Valor medido (mm)</b>	<b>Registro fotográfico</b>	<b>% error</b>	<b>error</b>
<b>1</b>	Anchura frame del drone	80	80		0	0

2	Anchura drone	brazo	8	7.95		0.625	0.05
3	Diámetro interior	hueco	10	10		0	0


*Fuente. Autores.*



De la anterior tabla se obtuvo, un error promedio de error de 0.2%

Los siguientes resultados, para la función de **impresión 3D**:

Se realizó un cubo de calibración X, Y, y Z, el cubo mide 20 mm de largo en cada una de sus aristas obteniendo los siguientes resultados:

*Ilustración 50. Toma de datos de la precisión dimensional de la impresión 3D.*

Medida	Descripción	Valor diseño (mm)	Valor medido (mm)	Registro fotográfico	% error	error (mm)
1	Longitud X	20	20.35		1.7	0.5

2	Longitud Y	20	20.35		1.7	0.5
3	Longitud Z	20	20		0	0

*Fuente. Autores.*

Adicional en base, a los resultados se tomaron las siguientes fotografías para el análisis de la superficie:

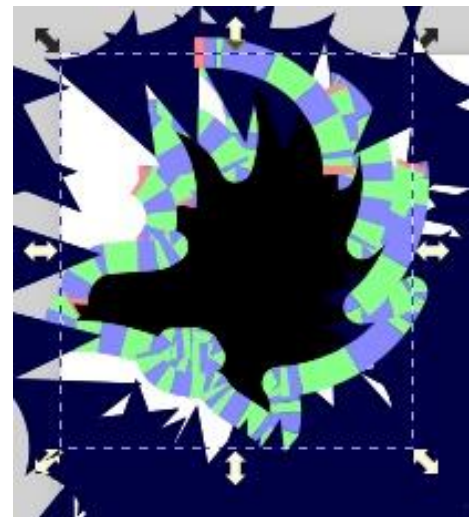
*Ilustración 51. Cubo XYZ análisis de la superficie.*



*Fuente. Autores.*

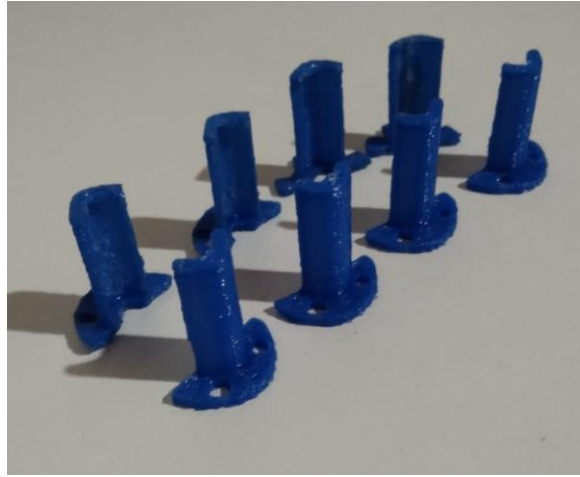
En base, al registro anterior se observa efecto ondulatorio en la deposición del PETG, adicional se observa el efecto que en el eje Y es donde baja la calidad de la impresión con respecto al eje X. En el eje Z no se aprecia un error, pero en el eje X y Y si se aprecia. Adicional, se observa que el porcentaje de error aumento en la impresión 3D, con respecto al error en la prueba CNC. Mediante observación visual y a teniendo en cuenta los resultados anteriores, se observa que cuando la máquina realiza movimiento en los que existe un cambio importante en las aceleraciones, se produce vibraciones que reducen la calidad de las operaciones, en especial se observa en la impresión 3D, debido a que al realizar el relleno existen cambios bruscos en la aceleración y velocidad, el movimiento en el que más se aprecia el efecto de esta vibración, es a lo largo del eje Y. Adicional se, realizaron otras operaciones para evaluar el comportamiento de la impresión 3D y la CNC, a continuación, se comparte parte del registro fotográfico:

*Ilustración 52. Grabado CNC sobre PCB usando Motor Tool.*



*Fuente. Autores.*

*Ilustración 53. Soporte para motores del Drone por medio de Impresión 3D de PETG.*

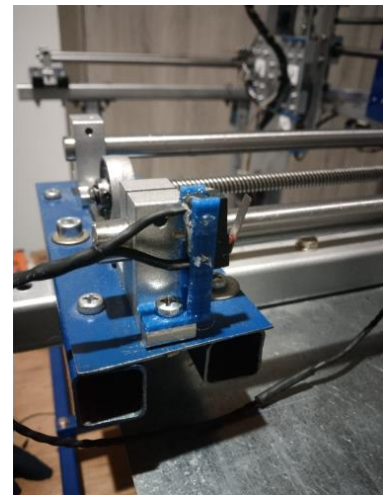
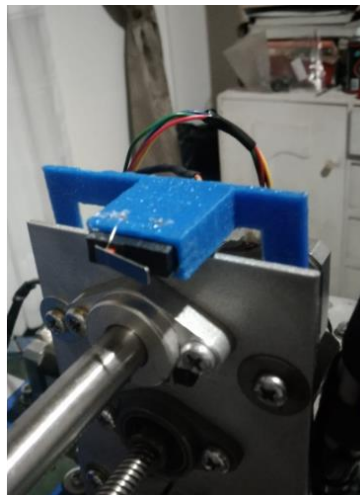
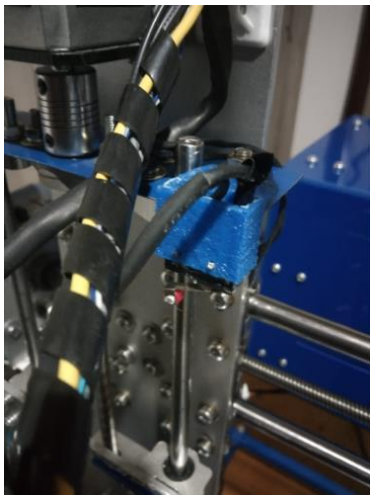


*Fuente. Autores.*

Accesorios para el mismo prototipo que se está desarrollando, realizados en Impresión 3D de PETG:

Durantes los procesos realizados no se observa ningun comportamiento anamola o prejudicial para la mauina o el resultado de la mauina, salvo las vibracion en los movimientos bruscos mencionados anteriormente.

*Ilustración 54. Accesorios creados mediante impresión 3D para el prototipo.*



*Fuente. Autores.*

#### Velocidad de la Operación:

Durante el cálculo de torque se obtuvo que el motor 17HS4401 tiene un torque de 0.022 Nm, muy por encima del torque 0.006025 Nm, calculado para cada motor del eje X, y coincide con el toque más alto calculado. Puesto que la masa de las herramientas y de la estructura asociada a los movimientos no cambia. Esto nos permite ver que usando estos motores podemos obtener aceleraciones y velocidades significativamente más altas, en este momento la velocidad máxima es de 60mm/s y la aceleración es de 50 mm/s<sup>2</sup>. Sin embargo, máquinas que realizan la función de impresión 3D pueden incluso desarrollar velocidades de 80 a 120 mm/s, y aceleración de 200 m/s<sup>2</sup>. Los motores con lo que cuenta la máquina puede ofrecer mayores prestaciones de velocidad y aceleración, sin embargo, al realizar movimientos bruscos, es decir cambios de dirección o aceleraciones altas las vibraciones aumentan afectando la calidad de las operaciones. Por el momento es recomendable no aumentar la velocidad a más de 60 mm/s y la aceleración a más de 50 mm/s<sup>2</sup>, a menos de que se control efectivamente las vibraciones.

## 9. ALCANCES Y LIMITACIONES

### 1) Alcances:

- El proyecto se enfocará en el desarrollo de un prototipo funcional, no en una máquina de producción a escala industrial.
- Se fabricarán y evaluarán componentes específicos del dron (Frame-Accesorios) como prueba de concepto.
- La evaluación de costos se basará en la producción de componentes seleccionados, no en la fabricación completa de un dron.

### 2) Limitaciones:

- El proyecto no incluirá la optimización completa del diseño para producción en masa.
- La evaluación de costos se limitará a una comparación directa de costos de materiales y tiempo de producción, sin considerar factores a largo plazo como mantenimiento o vida útil del equipo.
- El análisis de precisión y acabado se realizará con los recursos disponibles en los estudiantes, lo que podría limitar la profundidad del análisis en comparación con estándares industriales avanzados.
- El recurso computacional se ve limitado debido a los elementos electrónicos del equipo de trabajo.



El cronograma presentado ilustra la planificación detallada del proyecto, abarcando un período desde octubre de 2023 hasta septiembre de 2024. Este diagrama de Gantt proporciona una visión integral de las fases y tareas del proyecto, desglosadas en actividades específicas con sus respectivas fechas de inicio y finalización.

La estructura del cronograma refleja una secuencia lógica de actividades, comenzando con la fase de conceptualización y diseño, seguida por la implementación técnica, y concluyendo con las etapas de prueba, documentación y entrega. Cada tarea está claramente delimitada en el tiempo, permitiendo una gestión eficiente de los recursos y facilitando el seguimiento del progreso del proyecto.

Este cronograma sirve como herramienta fundamental para la gestión del proyecto, proporcionando una base sólida para la coordinación de esfuerzos, la asignación de recursos y el cumplimiento de los hitos establecidos. La representación visual de las duraciones y dependencias entre tareas facilita la identificación de puntos críticos y la anticipación de posibles desafíos en la ejecución del proyecto.

## 11. CONCLUSIONES

- La máquina multifuncional desarrollada se ha demostrado versátil y eficiente, capaz de realizar diferentes operaciones como impresión 3D, corte láser y mecanizado de PCB, lo que la convierte en una solución económica e integral para pequeñas y medianas empresa, en este caso la fabricación de piezas para drones para usos agrícolas. De acuerdo con la definición de "máquina-herramienta", es un equipo que, mediante control automatizado y búsqueda de la precisión, permite moldear, cortar o fabricar piezas siguiendo los requerimientos del cliente. Además, se construyeron accesorios adicionales utilizando el mismo prototipo, lo que refuerza su capacidad para auto optimizar su uso y ampliar sus funcionalidades. Una máquina herramienta construye otras máquinas, el prototipo desarrollado cumple esa característica.
- El análisis estático realizado en SolidWorks confirmó que el diseño es estructuralmente sólido bajo las condiciones de operación simuladas, específicamente en el análisis estático. Sin embargo, aunque se obtuvo un rendimiento satisfactorio en términos de vibraciones, por limitaciones instrumentales y temporales no se consideraron estas vibraciones. En la práctica, se hacen evidentes al incrementar la velocidad de operación, lo que afecta ligeramente el desempeño. A pesar de esto, la máquina demostró un uso óptimo en todas las operaciones planificadas, cumpliendo las operaciones de prueba, sin que las partes móviles se atacaran o estrellaran. Es decir, la maquina fabrico piezas, según lo esperado. Ahora bien, reducir y controlar las vibraciones permitirá que las capacidades de velocidad y aceleración en los movimientos mejoren significativamente, aumentando la efectividad de la máquina en entornos industriales. Por otra parte, el prototipo desarrollado permite contar con una

máquina multifuncional de amplia versatilidad, dada las tres funciones con las que está dotada, y a un costo bajo en comparación con las máquinas comerciales actuales que cubren las tres funciones descritas: corte/grabado láser, mecanizado de PCB e impresión 3D.

## 12. RECOMENDACIONES

1.) Análisis de vibraciones: un estudio detallado de las vibraciones de la máquina proporcionaría:

- ✓ Identificación de frecuencias resonantes y fuentes de vibración no deseadas.
- ✓ Oportunidades para optimizar la estructura y los componentes móviles para reducir vibraciones.
- ✓ Datos para implementar algoritmos de control adaptativo que puedan compensar las vibraciones en tiempo real.
- ✓ Mejora en la calidad de acabado superficial y precisión dimensional en las piezas fabricadas.

2.) Control de vibraciones, debido a que durante movimiento donde existe una muy alta velocidad y fuertes aceleraciones se percibe vibraciones que afectan la precisión, por limitaciones instrumentales no se pudo realizar un análisis profundo. Una vez se pueda realizar este estudio, se recomienda evaluar el uso de arriostramiento para evitar vibraciones: Al arriostramiento es una técnica estructural que implica la adición de elementos de soporte diagonal o cruzado para aumentar la rigidez y estabilidad de una estructura. En el contexto de una máquina multifuncional, la implementación de arriostramiento podría:

- ✓ Reducir significativamente las vibraciones durante las operaciones de alta velocidad o carga.
- ✓ Mejorar la precisión de mecanizado y corte al minimizar las oscilaciones no deseadas.
- ✓ Aumentar la vida útil de los componentes mecánicos al reducir el estrés estructural.
- ✓ Permitir velocidades de operación potencialmente más altas sin comprometer la calidad

del trabajo.

3.) Husillo manejado por software, en sustitución del control PWM actual, el cual se acciona físicamente desde el tablero de conexiones: la transición de un control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) a un control por software para el husillo podría ofrecer:

- ✓ Mayor precisión en el control de velocidad y posición del husillo.
- ✓ Capacidad para implementar perfiles de velocidad complejos adaptados a diferentes materiales y operaciones.
- ✓ Mejor integración con el sistema de control general de la máquina, permitiendo una coordinación más precisa entre el movimiento del husillo y los ejes.
- ✓ Posibilidad de implementar funciones avanzadas como compensación de carga y detección de colisiones.

4.) Análisis térmico: la realización de un análisis térmico exhaustivo de la máquina multifuncional permitiría:

- ✓ Identificar puntos de generación y acumulación de calor durante la operación.
- ✓ Evaluar el impacto de las variaciones térmicas en la precisión y rendimiento de la máquina.
- ✓ Diseñar sistemas de disipación de calor más eficientes para componentes críticos.
- ✓ Implementar estrategias de compensación térmica en el software de control para mantener la precisión en diferentes condiciones de operación.

5.) Implementación de una salida de 24V para mayor aprovechamiento de la potencia óptica del láser: la adición de una salida de 24V dedicada al sistema láser podría ofrecer:

- ✓ Mayor potencia disponible para el módulo láser, permitiendo cortes más profundos o velocidades de trabajo más altas.

- ✓ Flexibilidad para utilizar una gama más amplia de módulos láser de mayor potencia.
  - ✓ Mejora en la eficiencia energética al proporcionar un voltaje más adecuado para los componentes del láser.
  - ✓ Posibilidad de implementar funciones de seguridad adicionales específicas para operaciones láser de alta potencia.
- 6.) Desarrollar software que permita configurara y ejecutar las diferentes operaciones de manera centralizada, lo cual impactaría lo siguiente:
- ✓ Mejor experiencia de usuario.
  - ✓ Facilidad en administrar y manejar las capacidades de la máquina.
- 7.) Implementación de Raspberry Pi, en lugar de Arduino Mega, lo cual impactaría de manera positiva la electrónica que controla la maquina multifuncional, mejorando los siguientes aspectos:
- ✓ Mejora la monitorización mediante diferentes sensores como es la corriente, voltaje cámaras, entre otras.
- 8.) Implementación de barreras físicas para la seguridad: que garantice una separación efectiva entre el operario y los componentes críticos en movimiento. Este tipo de protección puede consistir en paneles transparentes resistentes a impactos, que además permitan una supervisión visual continua del proceso, y puertas de acceso con enclavamientos de seguridad que detengan automáticamente la operación si se abren mientras la máquina está en funcionamiento, se mejoraría estos aspectos:
- ✓ Eficiencia Operativa: Al reducir la probabilidad de accidentes y sus consecuentes interrupciones, se mejoraría la eficiencia operativa de la máquina. Menos paradas por incidentes de seguridad se traducen en un mayor tiempo de producción y una utilización

más efectiva de los recursos.

- ✓ **Confianza y comodidad del operario:** Un entorno de trabajo más seguro aumenta la confianza del operario al utilizar la máquina, lo que puede traducirse en una mayor disposición y eficacia en las tareas. Esto también puede contribuir a un ambiente laboral más positivo y menos estresante.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

- 1) ACOPI. (2021). Estudio sobre la adopción de tecnologías de precisión en las PYMES agrícolas de Colombia.
- 2) Aeronáutica Civil de Colombia. (2020). *Plan Nacional de Drones 2020-2024*. Bogotá D.C.: Aeronáutica Civil de Colombia. Obtenido de <https://www.aerocivil.gov.co/>
- 3) American Institute of Steel Construction. (2022). *Steel Construction Manual*.
- 4) American Society of Civil Engineers. (2023). *ASCE/SEI 7-22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*.
- 5) ANIF. (2021). *Estudio sobre el Impacto Económico y Social de la Industria de Drones en Colombia*. Bogotá D.C.: ANIF.
- 6) ANIF. (2021). *Retos y Oportunidades de las PYMES*. Bogotá: ANIF. Obtenido de <https://www.anif.com.co/comentarios-economicos-del-dia/retos-y-oportunidades-de-las-pymes/>
- 7) Arvind, K., Aishwarya, K., & Pavan, K. (2022, abril 29). Drone Technology in Sustainable Agriculture: The Future of Farming Is Precision Agriculture and Mapping. *Earth and Environmental Science*, 3-12. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-030-93262-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93262-6_1)
- 8) ASM International. (2021). *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*.
- 9) Assunção, E., Karunakaran, K. P., Bandari, Y., Ding, D., & Wu, B. (2018). *Hybridization in wire arc additive manufacturing (WAAM)*. *Frontiers in Mechanical Engineering*. Obtenido de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2018.00013/full>
- 10) Astm Internacional. (2019, Julio 04). *ASTM*. Obtenido de ASTM: [https://www.astm.org/a0036\\_a0036m-19.html](https://www.astm.org/a0036_a0036m-19.html)
- 11) Aviación No Tripulada UA. (2023). *Plan Estrategico de Aviacion No Tripulada 2023-2026*. Bogotá:

Aeronautica Civil. Obtenido de <https://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/sistema-de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas-drones>

- 12) Aviación No Tripulada UA. (2023). *Reporte F-Drone 2023*. Bogotá: Aeronautica Civil. Obtenido de <https://www.aerocivil.gov.co/servicios-a-la-navegacion/sistema-de-aeronaves-pilotadas-a-distancia-rpas-drones>
- 13) Banco Mundial. (2020). *Informe sobre el Desarrollo Mundial 2020: La Manufactura en un Mundo en Transformación*. Washington DC: Grupo Banco Mundial. Obtenido de <https://documents1.worldbank.org/curated/en/354321570785775212/pdf/Overview.p>
- 14) Bertoglio, O., & Sehnem, S. (2024). *Industria 4.0 en el contexto de los agronegocios: una revisión sistemática de la literatura*. *Procedia Ciencias de la Computación*. Brasil: ELSERVIER. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.011>
- 15) Bolton, W. (2025). *Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering (6th ed.)*. Pearson.
- 16) Chang, A. (2016). *Diseño, modelación y simulación de un sistema de impresión 3d basado en sistemas de cadena cinemática cerrada con 4 grados de libertad tipo delta*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16779>
- 17) Constitución Política de Colombia. (1991).
- 18) DANE. (2017). *Encuesta Anual Manufacturera*. Bogotá: DANE. Obtenido de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/eam/boletin\\_eam\\_2016.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/eam/boletin_eam_2016.pdf)
- 19) DANE. (2021). Encuesta de Inversión en Investigación y Desarrollo I+D. *DANE*, 25-28. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/tecnologia-e-innovacion/encuesta-de-inversion-en-investigacion-y-desarrollo-i-d>
- 20) DANE. (2024). *Encuesta Mensual Manufacturera con Enfoque Territorial - EMMET Diciembre*

2023. Bogotá: DANE. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/EMMET/bol-EMMET-dic2023.pdf>
- 21)** Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina. (2000). *Régimen Común sobre Propiedad Industrial*.
- 22)** Design & Make. (2022). La fábrica digital y los datos conectados: el futuro de la fabricación. *Autodesk*, 1. Obtenido de <https://www.autodesk.com/es/design-make/articles/fabrica-digital>
- 23)** DNP. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026*. Bogotá: DNP. Obtenido de <https://www.dnp.gov.co>
- 24)** Documento Conpes 3866 de 2016. (s.f.). *Política Nacional de Desarrollo Productivo*.
- 25)** El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Economía Circular en Colombia*. Bogotá: MinAmbiente. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co>
- 26)** FAO. (2021). E-agriculture in Action. Drones for agriculture. *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/I8494EN/i8494en.pdf>
- 27)** Feng, Y., & Harring, J. (2020). Book Review Structural Equation Modeling: Applications using Mplus (Wang and Wang 2020). (ELSEVIER, Ed.) 526–530. doi:<https://doi.org/10.1007/s11336-020-09706-5>
- 28)** Galeano, E. (2017). *Agricultura. Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuari*.
- 29)** Gómez, M., & Rodríguez, J. (2023). *Las arquitecturas cinemáticas en serie como una alternativa para la fabricación flexible en las PYMES*. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier.
- 30)** Groover, M. (2020). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing (5th ed.). *Pearson*.
- 31)** Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Elsevier*, 99-131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>

- 32) Huang, Y., Humberto Jara, J. H., Montes, J., & Gomero, L. (2018). *Aplicaciones de los drones en la agricultura peruana*. Anales Científicos.
- 33) Huang, y., Thomson, S., Hoffman, W., Lan, Y., & Fritz, B. (2013). *Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering.
- 34) Husnain, A., Mokhtar, N., Mohamed Shah, N., Dahari, M., & Iwahashi, M. (2023). *A Systematic Literature Review (SLR) on Autonomous Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles*. Drones.
- 35) Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (s.f.). *Norma Técnica Colombiana NTC 4109: Máquinas Herramienta. Seguridad*.
- 36) Junaid, A. (2017). The Science Behind User Experience Design. In: Bernhaupt, R., Dalvi, G., Joshi, A., K. Balkrishan, D., O'Neill, J., Winckler, M. (eds) Human-Computer Interaction – INTERACT 2017. *Springer link*, 399-401. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-319-68059-0\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68059-0_39)
- 37) Justin, N. (2004). *Unmanned aircraft systems: Overview and prospects*. *Aerospace and Electronic Systems*. IEEE Transactions on.
- 38) Kashaev, N., & Wang, M. (2024). On the maintenance of processing stability and consistency in laser-directed energy deposition via machine learning. *ScienceDirect*, 1-17. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.01.005>
- 39) Kiesmüller, M., Salomon, M., & Voss, S. (2019). *On a versatile scheduling concept of maintenance activities for increased availability of production resources*. Patras: European Journal of Operational Research. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.065>
- 40) Kimon, V. (2007). *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*. Tampa, Florida, USA: Universidad del Sur de Florida. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=EsjPyblwMdQC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Unm>

anned+aerial+vehicles:+Communication+and+control+technology,+Valavanis&ots=ESkQ0aDGrv  
&sig=11fbE8\_1-

2rxLWEy5VHw2kis4kE#v=onepage&q=Unmanned%20aerial%20vehicles%3A%20Communicat

- 41)** La República. (2024). Futuro en el mercado colombiano de los drones está en las aplicaciones comerciales. *La República*, 1. Obtenido de <https://www.larepublica.co/empresas/futuro-en-el-mercado-colombiano-de-los-drones-esta-en-las-aplicaciones-comerciales-3646737>
- 42)** Ladino Fernández, J. M., Briceño Barrero, D. L., & Rodríguez Rojas, L. A. (2022, junio 1). Industria 4.0: el reto para las pymes manufactureras de Bogotá, Colombia. *MUTIS*. doi:<https://doi.org/10.21789/22561498.1784>
- 43)** Leng, J., Chen, Z., Sha, W., Ye, S., Lui, Q., & Chen, X. (2022). *Cloud-edge orchestration-based bi-level autonomous process control for mass individualization of rapid printed circuit boards prototyping services*. Guangdong Province: ELSERVIER. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.03.008>
- 44)** Ley 1014 de 2006. (s.f.). *Por la cual se dictan normas para el fomento a la cultura de emprendimiento empresarial*.
- 45)** Ley 1286 de 2009. (s.f.). *Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, se transforma a Colciencias en Departamento Administrativo, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia y se dictan otras disposiciones. .*
- 46)** Ley 2069 de 2020. (s.f.). *Por la cual se impulsa el desarrollo de la tecnología de impresión 3D en Colombia*.
- 47)** Li, X., Chen, Y., & Yang, S. (2022). *Implementation of a precise motion control system for a multifunctional machine with applications in manufacturing industry*. IEEE Xplore.
- 48)** Lin Engineering. (s.f.). *NEMA 17 Bipolar Stepper Motor*. Obtenido de

<https://www.linengineering.com/products/stepper-motors/hybrid-stepper-motors/4418-series>

- 49)** Machinery, M. (2020). *Hybrid CNCs expand additive manufacturing*. Obtenido de Matsuura Machinery USA.: <https://www.matsuurausa.com>
- 50)** Mahalik, N. P. (2010). *Mechatronics: Principles, concepts and applications*. Tata McGraw-Hill Education.
- 51)** Mastoner. (s.f.). *Partes del extrusor de una impresora 3D y sus piezas*. Obtenido de <https://mastoner.com/blog/partes-extrusor-impresora-3d-piezas/>
- 52)** MercadoLibre. (s.f.). *LEDMO Convertidor de Conmutación Adaptador de Fuente de Alimentación*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1174863903-ledmo-convertidor-de-conmutacion-adaptador-de-fuente-de-ali-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1174863903-ledmo-convertidor-de-conmutacion-adaptador-de-fuente-de-ali-_JM)
- 53)** MinCIT. (2021). *Colombia Productiva: Estrategia para el desarrollo industrial*. Bogotá: MinCIT. Obtenido de <https://www.colombiaproductiva.com>
- 54)** Ministerio de Industria, Innovación y Turismo. (2020). *Impacto de las tecnologías avanzadas en las PYMES manufactureras*. Ministerio de Industria, Innovación y Turismo.
- 55)** Montes, C. (2017). *Arquitectura híbrida: Una estrategia de diseño para espacios contemporáneos*. Revista de Arquitectura.
- 56)** Montes, M. (2021). *Investigación de desarrollo tecnológico: Características y desafíos*. Madrid: Editorial Universitaria.
- 57)** Munkvold, B. E. (2021). *CAD model quality in additive manufacturing: A review, analysis and path forward*. Additive Manufacturing.
- 58)** National Competitiveness Council (Ireland). (2016). *Ireland's Competitiveness Challenge 2016*. Irlanda: Department of Business. Obtenido de <https://enterprise.gov.ie/en/publications/publication-files/irelands-competitiveness-scorecard-2023.pdf>

- 59) National Competitiveness Council. (2020). *Competitiveness Scorecard Report*.
- 60) Nikolakis, N., Bampoula, X., & Alexopoulos, K. (2023). *Scheduling predictive maintenance with production tasks: A steel industry case study*. *Laboratory for Manufacturing Systems and Automation*. Patras: Department of Mechanical Engineering and Aeronautics. Obtenido de <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2086056>
- 61) Nip, K. H. (2021). *Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel*. *Journal of Constructional Steel Research*.
- 62) Orlandi, P. (2021). Las Pymes y su rol en el Comercio Internacional. *White Paper Series del Centro de Estudios para el Desarrollo Exportador – CEDEX*, 15. Obtenido de [https://www.palermo.edu/cedex/pdf/pyme\\_com\\_internacionall.pdf](https://www.palermo.edu/cedex/pdf/pyme_com_internacionall.pdf)
- 63) Pérez, M. (2021). *La investigación cualitativa y el sector real*.
- 64) Pino, E. (2019). Los drones una herramienta para una agricultura eficiente: un futuro de alta tecnología. *Idesia (Arica)*, 37(1), 1. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000402>
- 65) Pololu Robotics & Electronics. (s.f.). *A4988 Stepper Motor Driver Carrier*. Obtenido de <https://www.pololu.com/product/1182>
- 66) Porpíglío, I., Scalice, R., & Silveira, Z. (2019). *Axiomatic design and solution variants applied to a modular 3D printing head based in material extrusion*. Brasil: Procedia CIRP.
- 67) Porter, M. (1990). The competitive advantage of nations. *Harvard Business Review*, 73-93.
- 68) Porter, M. (1998). *What is value competition?* *Harvard Business Review*. Massachusetts: Harvard.
- 69) Prado, S., Peralta Alemán, M., Maraví, D., & Iparraguirre, M. (2018). Diseño e Implementación de una Impresora 3D Core XY multifuncional. *Universidad Cesar Vallejo*, 75-85. doi:<https://doi.org/10.18050/td.v16i1.1960>
- 70) ProColombia. (2023). *Sector de drones en Colombia: Una industria en auge*. ProColombia. Obtenido

de <https://procolombia.co/>

- 71) PTP. (2021). *Programa de Transformación Productiva*. Bogotá: PTP. Obtenido de <https://www.ptp.com.co>
- 72) Ramírez, C., López, J., & Hernández, J. (2023). *Diseño y análisis cinemático de una máquina multifuncional para el mecanizado de materiales compuestos*. La Rioja: Universidad de la Rioja.
- 73) Ramirez, K. (2021). Interfaz y experiencia de usuario: parámetros importantes para un diseño efectivo. *Scielo*, 49-54. doi:DOI: 10.18845/tm.v30i5.3223
- 74) Ramirez, K. (2021). *Interfaz y experiencia de usuario: parámetros importantes para un diseño efectivo. Tecnología en Marcha*.
- 75) Reg, A. (2010). *Unmanned aircraft systems: A survey of the current state of technology and applications*. *Unmanned Systems*. Reino Unido: Wiley. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=03gdqhU61C0C&oi=fnd&pg=PT14&dq=AUSTIN,+Unmanned+aircraft+systems:+A+survey+of+the+current+state+of+technology+and+applications.+Unmanned+Systems&ots=MymJdtpO2K&sig=w89cNZBQP-i8LkkJB1yJNRgVJmo#v=onepage&q&f=fa>
- 76) RepRap. (s.f.). *RAMPS 1.4*. . Obtenido de [https://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4)
- 77) Revista Dinero. (2021, 03 12). *Claves para fortalecer la industria nacional de defensa*. Obtenido de Semana: <https://www.semana.com/noticias/revista-dinero/>
- 78) Rivera Cuervo, N., & Rincón Gómez, A. (2018). PYMES DEL SECTOR AGRICULTURA EN COLOMBIA. ¿QUÉ TANTO LAS UNE EL COMPORTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN FINANCIERA? *Congreso internacional de contaduría, administración e informática*, 24. Obtenido de <https://investigacion.fca.unam.mx/docs/memorias/2018/1.07.pdf>
- 79) Ruiz, A., Morales, J., & Ortiz, S. (2020). *La industria de bienes de capital en América Latina*.

Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

- 80)** Sánchez, S. (2022). *Rediseño de máquina láser CNC*. Tecnológico Nacional de México.
- 81)** Serje, D., & Pacheco, J. (2017). *Cinemática paralela en la máquina-herramienta: Investigación, desarrollo y tendencias futuras*. Medellín, Colombia: DYNA. Recuperado el Junio 11, 2024, de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/60400/59572-328467-3-PB.pdf?sequence=1>
- 82)** Smid, P. (2003). *CNC programming handbook: A comprehensive guide to practical CNC programming (2nd ed.)*. Industrial Press Inc.
- 83)** Statista. (2023). *Drones - South America*. Estados Unidos: Statista. Obtenido de <https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/drones/south-america>
- 84)** Tao, F., Bi, L., Zho, Y., & Capra, A. (2018). *Concept and practice of a hybrid manufacturing process combining additive manufacturing and removal machining*. Journal of Manufacturing Science and Engineering.
- 85)** Tao, F., Bi, L., Zho, Y., & Capra, A. (2018). *Concept and practice of a hybrid manufacturing process combining additive manufacturing and removal machining*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. Obtenido de <https://doi.org/10.1115/1.4038644>
- 86)** Ultimaker. (s.f.). *Cama de Impresión Caliente*. Obtenido de <https://www.ultimaker.3dsolutions.com.co/product-page/cama-caliente>
- 87)** UNCTAD. (2023). *Technology and Innovation Report 2023. United Nations Conference on Trade and Development*. Obtenido de <https://unctad.org>
- 88)** UNIDO. (2022). *La Manufactura del Futuro: Oportunidades y Desafíos para el Desarrollo Sostenible*. Washington: UNIDO. Obtenido de <https://www.unido.org/>
- 89)** Valderrama, A. (2020). *Diseño e Implementación de un Sistema de Control CNC Compatible e Intercambiable para Impresión 3D, Corte y Fresado de materiales blandos en aplicaciones didácticas*.

- 90) Valentino, J., & Goldenberg, J. (2003). Introduction to computer numerical control (CNC) (3rd ed.). *Prentice Hall*.
- 91) Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., & Wakabayashi, T. (2004). Dry machining and minimum quantity lubrication. *CIRP Annals*, 511-537.
- 92) World Steel Association. (2022). *Steel Statistical Yearbook 2022*.
- 93) Zhang, C. D. (2020). *Corrosion behavior of hot-dip galvanized steel in simulated tropical marine atmosphere*. *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- 94) Zhang, C., & Kovacs, J. (2012). *The application of small unmanned aerial systems for precision*. Precision Agriculture.
- 95) ZuluPrints. (2018). *Filamento 3D PLA azul claro*. Obtenido de <https://zuluprints.co/producto/filamento-3d-pla-azul-claro/>

## 14. ANEXOS

Tabla 12. Empresas líderes globales en drones agrícolas.

Empresas de Drones para Agricultura de Precisión	Página Web
<b>DJI (China)</b>	<a href="https://ag.dji.com/">https://ag.dji.com/</a>
<b>DroneDeploy (EE.UU.)</b>	<a href="https://dronedeploy.com/">https://dronedeploy.com/</a>
<b>AgEagle (Suiza)</b>	<a href="https://ageagle.com/">https://ageagle.com/</a>
<b>Dronix (España)</b>	<a href="https://dronix.co.il/">https://dronix.co.il/</a>
<b>AgEagle Aerial Systems (EE.UU.)</b>	<a href="https://www.hyl.io/ag-272-product-page">https://www.hyl.io/ag-272-product-page</a>

Fuente. Autores.

Tabla 13. Empresas que fabrican drones agrícolas en Colombia.

Empresa	Ubicación	Costo Promedio	Beneficios
<b>Drones de Colombia S.A.S</b>	Cali, Valle del Cauca	\$5.000.000 - \$20.000.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Drones para fumigación de cultivos, control de plagas y enfermedades.</li> <li>- Reducción en el uso de agua y pesticidas.</li> <li>- Mayor eficiencia y productividad en la agricultura.</li> <li>- Monitoreo del estado de los cultivos y detección temprana de problemas.</li> <li>- Optimización del uso de fertilizantes y herbicidas.</li> <li>- Generación de mapas de salud de los</li> </ul>

---

			cultivos para una mejor toma de decisiones.
<b>Helicol</b>	Bucaramanga,	\$8.000.000 -	- Drones para fumigación de cultivos,
	Santander	\$40.000.000	control de plagas y enfermedades.
			- Reducción en el uso de agua y pesticidas.
			- Mayor eficiencia y productividad en la agricultura.
			- Monitoreo del estado de los cultivos y detección temprana de problemas.
			- Optimización del uso de fertilizantes y herbicidas.
			- Generación de mapas de salud de los cultivos para una mejor toma de decisiones.
			- Asesoría técnica en la aplicación de drones para la agricultura.
<b>Ikaró Drones Agrícolas</b>	Cali, Valle del Cauca	\$6.000.000 - \$25.000.000	- Drones para fumigación de cultivos, control de plagas y enfermedades.
			- Reducción en el uso de agua y pesticidas.
			- Mayor eficiencia y productividad en la agricultura.

---

- 
- Monitoreo del estado de los cultivos y detección temprana de problemas.
  - Optimización del uso de fertilizantes y herbicidas.
  - Generación de mapas de salud de los cultivos para una mejor toma de decisiones.
  - Amplia experiencia en la aplicación de drones para la agricultura en Colombia.
- 

*Fuente. Autores.*