



Universidad **Mariana**

Desarrollo de un prototipo a escala de máquina CNC de impresión 3D para la construcción de
viviendas de interés social en la ciudad de Pasto, Nariño

Miguel Santiago Martínez

Sebastián Lagos Vidal

Ximena Alejandra Rosero

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Mecatrónica
San Juan de Pasto
2025

Desarrollo de un prototipo a escala de máquina CNC de impresión 3D para la construcción de viviendas de interés social en la ciudad de Pasto, Nariño

Miguel Santiago Martínez
Sebastián Lagos Vidal
Ximena Alejandra Rosero

Informe de proyecto para optar al título de: Ingenieros mecatrónicos

Richard Geovanni Moran Perafán, PhD
Asesor

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Mecatrónica
San Juan de Pasto
2025

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007
Universidad Mariana

Contenido

1. Resumen del proyecto	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Justificación	1
1.4. Objetivos	2
1.4.1. Objetivo general	2
1.4.2. Objetivos específicos	2
1.5. Marcos de referencia	3
1.5.1. Marco de antecedentes	3
1.5.2. Marco teórico	6
1.5.2.1. Viviendas de interés social	6
1.5.2.2. Vivienda de interés prioritario	6
1.5.2.3. Viviendas de autoconstrucción asistida	6
1.5.2.4. Impresión 3D	7
1.5.2.4.1. Cartesiana	7
1.5.2.4.2. Delta	8
1.5.2.4.3. Brazo robot	9
1.5.2.4.4. Core XY	9
1.5.2.5. Velocidad de Impresión	9
1.5.2.6. Precisión	10
1.5.2.7. Tamaño de Construcción	10
1.5.2.8. Uso de Materiales	10
1.5.2.9. Tipos de impresión 3D.	10
1.5.2.9.1. Estereolitografía (SLA).	10
1.5.2.9.2. Sinterización Selectiva Por Láser (SLS).	10

1.5.2.10. Materiales de impresión 3D.	11
1.5.3. Marco conceptual	12
1.5.3.1 Arcilla.	12
1.5.3.2. Extrusor.	14
1.5.3.3. Sistema CNC.	16
1.5.3.4. Sistema de bombeo.	17
1.5.3.5. Diseño mecánico.	19
1.5.3.6. Diseño electrónico.	19
1.5.3.6.1. Microcontrolador.	19
1.5.3.6.2. Drivers de motor.	20
1.5.3.6.3. Sensores.	21
1.5.3.7. Fuente de alimentación	22
1.5.3.8. Software de control	22
1.5.3.9. Tarjeta electrónica	22
1.6. Metodología	22
1.6.1. Tipo de investigación	22
1.6.2. Línea de investigación y sublínea del grupo de investigación	22
1.6.3. Hipótesis de investigación	23
1.6.4. Descripción metodológica	23
1.6.4.1. Identificación de la necesidad	25
1.6.4.2. Investigación preliminar	25
1.6.4.3. Planteamiento de objetivos	25
1.6.4.4. Especificaciones de desempeño	25
1.6.4.5. Ideación e invención	26
1.6.4.6. Análisis	26
1.6.4.7. Selección	26

1.6.4.8. Diseño detallado	27
1.6.4.9. Creación de prototipo y pruebas	27
1.6.4.10. Planificación del proyecto	27
2. Presentación de resultados	29
2.1. Resultados del objetivo 1	29
2.1.1. Mecanismo CNC	31
2.1.2. Extrusor	36
2.1.3. Material	37
2.1.4. Especificaciones de desempeño	37
2.1.4.1. Especificación de dimensión	38
2.1.4.2. Especificación de sistema de extrusión	38
2.1.4.3. Facilidad de limpieza del extrusor	39
2.1.4.4. Sistema de almacenamiento de material	39
2.1.4.5. Sostenibilidad del material	39
2.1.4.6. Restricción presupuestaria	40
2.2. Resultados de objetivo 2	40
2.2.1. Resultado de creación e invención	40
2.2.2. Resultado de análisis	42
2.2.2.1. Actuadores empleados en sistemas CNC	43
2.2.2.2. Transmisiones y reductores en sistemas CNC y sistemas de bombeo	44
2.2.2.3. Análisis de opciones de morfología del robot	45
2.2.2.3.1. Alternativa 1: robot cilíndrico con 3 GDL	45
2.2.2.3.2. Alternativa 2: Robot antropomórfico con 3 GDL	46
2.2.2.3.3. Alternativa 3: Robot polar con 3 GDL	47
2.2.2.3.4. Alternativa 4: Robot cartesiano con 3 GDL	48
2.2.2.4. Análisis de alternativas de extrusor	49

2.2.2.4.1. Alternativa 1: Extrusor con acople directo y tornillo sin fin	50
2.2.2.4.2. Alternativa 2: Extrusor con correas dentadas	51
2.2.2.4.3. Alternativa 3: Extrusor con engranajes rectos de una pieza	52
2.2.2.4.4. Alternativa 4: Extrusor con transmisión de tornillo sin fin y corona	53
2.2.2.4.5. Alternativa 5: Extrusor con actuador neumático de dos piezas	54
2.2.2.5. Análisis de material	54
2.2.3. Resultado de selección	55
2.2.3.1. Selección de morfología del robot	56
2.2.3.2. Alternativas de diseño cartesiano	61
2.2.3.2.1. Alternativa de robot cartesiano 1: Husillo y tuerca con guías lineales	63
2.2.3.2.2. Alternativa de robot cartesiano 2: Piñón – cremallera con guías de rieles lineales	65
2.2.3.2.3. Alternativa de robot cartesiano 3: Poleas y correas dentadas, guías lineales y un motor en eje Y	67
2.2.3.2.4. Alternativa de robot cartesiano 4: Poleas y correas dentadas con rodamientos en V	68
2.2.3.3. Selección de robot cartesiano	70
2.2.3.4. Selección del extrusor	72
2.2.4. Selección del material	77
2.2.5. Diseño detallado	81
2.2.5.1. Creación de modelos CAD	81
2.2.5.2. Análisis de cargas	83
2.2.5.2.1. Cálculo de cargas en el eje Y	89
2.2.5.2.2. Cálculo de cargas en el eje X	93
2.2.5.2.3. Cálculo de cargas en el eje Z	93
2.2.5.3. Simulación de CNC	94
2.3. Resultados de objetivo 3	94
2.3.1. Ensamble del prototipo	95

2.3.2. Integración de componentes eléctricos	98
2.3.3. Implementación del software de control	99
2.3.4 Ensamble del prototipo: Extrusor	100
2.4. Resultados del objetivo 4	104
3. Conclusiones	127
3.1. Mejoras del prototipo	128
4. Referencias	129
ANEXOS	135

Índice de Tablas

Tabla 1 Ventajas y desventajas de un robot cartesiano y cilíndrico	32
Tabla 2 Ventajas y desventajas de sistemas de transmisión para robots	44
Tabla 3 Tabla de combinación de morfología cilíndrica	57
Tabla 4 Tabla de combinación de morfología antropomórfica	58
Tabla 5 Tabla de combinación de morfología polar	59
Tabla 6 Tabla de combinación de morfología cartesiana	60
Tabla 7 Tabla de comparación de actuadores para robots	62
Tabla 8 Matriz de selección de robot cartesiano	71
Tabla 9 Matriz comparativa preliminar de alternativas de extrusor	72
Tabla 10 Tabla de puntajes de rendimiento relativo	73
Tabla 11 Matriz de evaluación de criterios de selección	74
Tabla 12 Matriz normalizada	75
Tabla 13 Tabla de prioridad, ponderación y justificación de criterios de evaluación	75
Tabla 14 Tabla de puntajes de rendimiento	76
Tabla 15 Tabla de proporciones de mezcla	78
Tabla 16 Tabla de características de las mezclas seleccionadas	80
Tabla 17 Pruebas de control	105
Tabla 18. Pruebas de extrusión	112
Tabla 19	123

Índice de Figuras

Figura 1 Impresión 3d con un extrusor de arcilla	15
Figura 2 Diseño de un prototipo de extrusor para impresión 3D.	15
Figura 3 La función más básica de cualquier máquina CNC es el control de movimiento automático, preciso y consistente.....	17
Figura 4 Bombeo de hormigón para sistemas estructurales	18
Figura 5 Los microcontroladores en casos de plástico dip28 son muy inferiores en tamaño a la placa base del comprimido.	20
Figura 6 Driver A4988 con su respectivo disipador.	21
Figura 7 Diagrama de flujo del proceso de diseño	23
Figura 8 Diagrama de actividades	28
Figura 9 Configuraciones de robots comunes en impresoras 3D de construcción	30
Figura 10 Configuraciones de robots comunes en impresoras 3D de construcción	31
Figura 11 Impresora Creality V3	35
Figura 12 Lluvia de ideas de prototipos de impresora 3d para construcción.....	41
Figura 13 Ejemplo de alternativa 1 robot cilíndrico RPP	46
Figura 14 Ejemplo de alternativa 2 robot antropomórfico RRR	47
Figura 15 Ejemplo de alternativa 3 robot cilíndrico RRP	48
Figura 16 Ejemplo de alternativa 4 robot cartesiano PPP	49
Figura 17 Ejemplo de alternativa 1 de extrusor	50
Figura 18 Ejemplo de alternativa 2 de extrusor	51
Figura 19 Ejemplo de alternativa 3 de extrusor	52
Figura 20 Ejemplo de alternativa 4 de extrusor	53
Figura 21 Registro fotográfico de pruebas de material	55
Figura 22 Alternativa 1 de robot cartesiano	63
Figura 23 Detalle de la transmisión mecánica lineal de la primera alternativa de robot cartesiano	64
Figura 24 Alternativa 2 de robot cartesiano	65

Figura 25 <i>Detalle de la transmisión mecánica lineal de la segunda alternativa de robot cartesiano</i>	66
Figura 26 <i>Alternativa 3 de robot cartesiano</i>	67
Figura 27 <i>Detalle de la transmisión mecánica lineal de la tercera alternativa de robot cartesiano</i>	68
Figura 28 <i>Alternativa 4 de robot cartesiano</i>	69
Figura 29 <i>Detalle de la transmisión mecánica lineal de la cuarta alternativa de robot cartesiano</i>	70
Figura 30 Registro fotográfico de muestras	79
Figura 31 <i>Registro fotográfico de las mezclas seleccionadas</i>	80
Figura 32 <i>Renderizado final del diseño CAD del prototipo</i>	82
Figura 33 <i>Perfiles estructurales</i>	83
Figura 34 Hoja de datos técnicos de aluminio 6063 T5	84
Figura 35 <i>Cálculos físicos del ensamblaje</i>	85
Figura 36 <i>Análisis estático: Tensión nodal</i>	86
Figura 37 <i>Desplazamiento estático</i>	87
Figura 38 <i>Ficha técnica de correa de distribución GT2</i>	88
Figura 39 <i>Ficha técnica de correa de distribución GT2</i>	89
Figura 40 <i>Propiedades físicas de las cargas sobre el eje Y</i>	90
Figura 41 Diagrama de cuerpo libre de cargas en el centro del eje Y	91
Figura 42 <i>Diagrama del cortante y momento flector</i>	92
Figura 43 <i>Construcción de la base y carro del eje Y</i>	96
Figura 44 <i>Ensamblaje terminado de los ejes X y Y</i>	97
Figura 45 <i>Configuración de driver TB6600</i>	99
Figura 46 <i>Enumeración de las piezas del extrusor</i>	101
Figura 47 <i>Boquilla del extrusor en eje Z</i>	102
Figura 48 <i>Ensamblaje de cartucho de polipropileno, motor NEMA 23 y tubo de conexión</i>	103
Figura 49 <i>Cartucho de polipropileno y driver motor NEMA 23</i>	103
Figura 50 <i>Ensamblaje de estructura CNC, extrusor y driver motor NEMA 23</i>	104
Figura 51 <i>Diagrama de proceso para las pruebas de control</i>	108
Figura 52. <i>Diseño de pieza Repetier Host</i>	109

Figura 53. Parámetros de impresión	109
Figura 54. Código G de la pieza cilíndrica.....	110
Figura 55. Pruebas de extrusión	111
Figura 56. Prueba de extrusión	111
Figura 57. Pruebas de extrusión #1 vista lateral.....	112
Figura 58. Diagrama de proceso de las pruebas de extrusión	115
Figura 59. Goma arábiga	116
Figura 60. Rocas de arcilla	117
Figura 61. Arcilla triturada	117
Figura 62. Arcilla molida y seca.....	118
Figura 63. Mezcla base de goma arábiga	119
Figura 64. Peso de arcilla y goma arábiga.....	119
Figura 65.....	120
Figura 66.....	120
Figura 67.....	121
Figura 68.....	121
Figura 69.....	122
Figura 70.....	125

Índice de anexos

Anexo A.....	136
Anexo B.....	137
Anexo C.....	138

1. Resumen del proyecto

1.1. Descripción del problema

La falta de vivienda adecuada y su vulnerabilidad reflejan la difícil situación social y económica que vive la mayoría de la población en América Latina y el Caribe. Particularmente en Pasto, la accesibilidad a vivienda es una problemática que afecta una alta proporción de la población y en mayor grado a personas de bajos recursos. Por ejemplo, según el (DANE, 2022) hasta el 2018 en Pasto había un total de 392.930 habitantes, un déficit global de vivienda de 22.4%, con un déficit cuantitativo de 6.1%, es decir, el número de viviendas disponibles es insuficiente para satisfacer la demanda de la población. Por otra parte, el otro 16,3% es cualitativo, que significa que las viviendas no son adecuadas porque no cumplen con los requisitos mínimos de habitabilidad, es decir seguridad, salubridad y comodidad. Las causas que contribuyen a esta situación son diversas, entre ellas se pueden destacar la falta de recursos económicos y tecnológicos, la falta de políticas públicas que aborden el problema de manera efectiva, y la falta de soluciones innovadoras y sostenibles.

La falta de viviendas asequibles es un problema que se presenta a nivel nacional. En la ciudad de Pasto el índice de pobreza es de un 25.4% y el índice de pobreza extrema es del 4.2% (DANE, 2020), lo que significa que un gran porcentaje de la población no tiene las posibilidades económicas de comprar o aún arrendar una vivienda, generando tendencias como el hacinamiento y las viviendas multifamiliares. Una de las principales dificultades para tener vivienda digna es el costo de producción y el tiempo que conlleva, por lo cual proponer soluciones innovadoras para construir vivienda de interés social con procesos más eficientes es una prioridad. La sostenibilidad también es un aspecto importante ya que los procesos de construcción son bastantes contaminantes. Se estima que el 40% de la energía producida a nivel mundial se usa en la construcción y el 8% de las emisiones de CO₂ antropogénicas están relacionadas con la industria de la construcción o la producción de materiales para ella (Haidong, y otros, 2016).

Una propuesta para reducir desperdicios, tiempo y mano de obra es aplicar tecnologías de impresión 3D al proceso de construcción, este proceso se ha usado en otros lugares y ha conducido a unos resultados exitosos. Por ejemplo, la compañía Winsun fue capaz de imprimir 10 casas en

menos de 24 horas y a un costo de 5000 USD cada una, usando esta tecnología (Castiblanco, 2015). Por su parte la empresa WASP imprimió varias viviendas en la provincia de Lombarda en Italia usando materiales locales como el barro y una impresora gigante tipo grúa (Arduino, 2021). A pesar de ello este proceso está en desarrollo y se necesita seguir aportando y desarrollando esta interesante tecnología. Algunos desafíos actuales son la aplicación de materiales menos contaminantes como el barro y la arcilla, garantizar calidad y resistencia del proceso, desarrollar códigos de construcción para este tipo de estructuras, disminuir los costos iniciales del equipamiento y mejorar los tiempos de construcción.

En Nariño hasta el conocimiento de los autores, no se ha aplicado este tipo de procesos ni tampoco se ha investigado o desarrollado equipos para hacerlo, proceso que ayudaría al desarrollo de vivienda de interés social y mitigar los déficits existentes en esta área. Por lo tanto, es este trabajo se propone el desarrollo de un prototipo de impresión de vivienda en 3D para aportar a la solución de la problemática descrita y aportando al desarrollo de la región desde la Ingeniería Mecatrónica. Así mismo este proyecto aportaría a la formación de los autores como ingenieros mecatrónicos al enfrentarse a un problema real y pertinente con las necesidades de la región.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo desarrollar un prototipo de impresión 3D a escala para la construcción de vivienda de interés social en la ciudad de Pasto, Colombia?

1.3. Justificación

La escasez de viviendas en la ciudad de Pasto, Colombia, son desafíos complejos que requieren soluciones innovadoras y asequibles. La dificultad de acceder a viviendas dignas, sumada a la difícil situación económica que enfrentan muchas familias, han llevado a una problemática social que afecta a una gran parte de la población. La construcción de viviendas de interés social en la zona es limitada debido al alto costo de los métodos de construcción tradicionales, por ejemplo, se estima que el tope de costo de una vivienda de interés social está entre los 156 a 174 millones de pesos (Ministerio de vivienda, 2023). Por otra parte, los métodos tradicionales se basan en materiales altamente contaminantes y costosos como el cemento y el acero, su producción está asociada a grandes emisiones de gases efecto invernadero y al uso intensivo de recursos no renovables (Haidong, et. Al., 2016).

En este sentido, la propuesta presente pretende plantear el desarrollo de un prototipo a escala de impresora 3D para la construcción de vivienda de interés social en Pasto, Colombia, como una solución innovadora, ecológica y práctica que puede abordar esta problemática. La impresión 3D es una tecnología emergente que utiliza la automatización y el control digital para construir objetos tridimensionales a partir de modelos digitales. En el caso de la construcción de viviendas, la impresora 3D puede producir muros y estructuras de manera rápida y eficiente, con materiales sostenibles. Además, esta tecnología permite un mayor control de la calidad. Por otra parte, teniendo en cuenta que los procesos constructivos son altamente inseguros, la impresión de 3D es una alternativa viable para hacer desarrollar estos procesos de una forma eficiente y segura.

Estudios señalan que la construcción con tecnología de impresión 3D puede disminuir del 50-80% los costos de mano de obra, reducir 30-60% los costos de construcción, y del 50 al 70% los tiempos de construcción (zhang, et. Al., 2019, *traducción propia*).

La elaboración de una impresora 3D para la construcción de viviendas de interés social en la ciudad de Pasto, Colombia, puede tener un impacto significativo en la región. En primer lugar, se espera que este proyecto sea una plataforma para desarrollos a escala completa donde se mejore las condiciones de vida de las familias más vulnerables en la región, proporcionándoles un hogar

seguro y cómodo. En segundo lugar, el uso de tecnologías emergentes como la impresión 3D puede contribuir al impacto en las industrias de la construcción y al desarrollo económico y social de la región, aumentando la demanda de materiales locales como también el aporte a la investigación y ampliación de nuevos conocimientos en el sector de la construcción. En tercer lugar, este proceso puede reducir significativamente los tiempos y costos de vivienda de interés social, lo que permitiría tener mayor acceso a ella. Finalmente, este proyecto representa una oportunidad para que los ingenieros mecatrónicos aporten al desarrollo de la región y consoliden oportunidades laborales para ellos en un departamento que requiere del aporte de la tecnología para ser más competitivo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo a escala de un sistema CNC de impresión 3D para la construcción de vivienda de interés social en la ciudad de Pasto, Colombia.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar tecnologías relacionadas con la impresión 3D de estructuras con el fin de identificar materiales y componentes críticos de funcionamiento y definir las especificaciones de desempeño del prototipo
- Diseñar el prototipo de impresora 3D teniendo en cuenta las especificaciones previamente definidas
- Construir el prototipo con base en el diseño planteado
- Realizar pruebas de funcionamiento y extraer conclusiones acerca de la factibilidad técnico-económica de la construcción de un prototipo a escala completa

1.5. Marcos de referencia

1.5.1. Marco de antecedentes

Los inicios de la impresión 3D en la construcción se remontan a los procesos de moldeo de contornos que inventó el profesor Khosnevis en 2004, en la Universidad de California, Estados Unidos (Chenyu, Dong-ce, Zhi, & Hengyu, 2022). Esta tecnología ha revolucionado la forma de construir, creando toda una industria alrededor de esta tecnología a nivel mundial. Una muestra de esto en la actualidad se ubica en China y se trata de la empresa Winsun que se dedica a la fabricación de edificios utilizando la tecnología de impresión 3D. La compañía ha sido pionera en la impresión 3D de edificios y ha construido diversas estructuras utilizando esta técnica.

Winsun 3D ha construido viviendas sociales, oficinas y hasta un castillo utilizando impresoras 3D gigantes. La empresa utiliza una mezcla de cemento y materiales reciclados para imprimir las estructuras, lo que la convierte en una opción sostenible y económica para la construcción. (BBC, 2014)

Otro beneficio de la tecnología de impresión 3D utilizada por Winsun 3D es su capacidad para crear diseños personalizados con rapidez y precisión. Según un artículo publicado en la revista Forbes, la tecnología de impresión 3D permite a la empresa crear estructuras complejas y detalladas con rapidez y sin la necesidad de herramientas y moldes costosos. Winsun 3D ha recibido reconocimiento internacional por su trabajo en la impresión 3D de edificios. En 2014, la empresa construyó 10 casas en 24 horas utilizando impresoras 3D, lo que le valió un récord Guinness. Además, en 2019, la empresa construyó un parque temático impreso en 3D en Dubái, que incluye diversas estructuras impresas en 3D, (Winsun3D, 2003)

Pero esta no es la única empresa relevante a nivel internacional, también tenemos a la empresa estadounidense ICON que se especializa en la construcción utilizando tecnología de impresión 3D. La empresa ha sido pionera en la impresión 3D de viviendas y ha construido diversas estructuras con esta técnica. ICON ha construido casas impresas en 3D en varias partes del mundo, incluidos

Estados Unidos, México y El Salvador (Marchante, 2021). La empresa utiliza una mezcla de cemento y otros materiales para imprimir las estructuras, lo que la convierte en una opción sostenible y rentable para la construcción. Otro beneficio de la tecnología de impresión 3D utilizada por ICON es su capacidad para crear diseños personalizados de forma rápida y precisa. Según un artículo del sitio web de Forbes, la tecnología de impresión 3D permite a la empresa crear estructuras complejas y detalladas rápidamente y sin necesidad de herramientas y moldes costosos.

ICON ha recibido reconocimiento internacional por su trabajo en la impresión 3D de viviendas. En 2018, la empresa construyó una casa impresa en 3D en Texas, Estados Unidos, en menos de 24 horas. Además, en 2019, la empresa construyó un vecindario impreso en 3D en México, que incluye varias casas impresas en 3D (Marchante, 2021).

Aunado a lo anterior, también se destacan las numerosas investigaciones en este ámbito, una de estas se evidencia en el documento titulado 3D Printing in Sustainable Buildings: Systematic Review and Applications in the United Arab Emirates, de la Universidad de Sharjah de los Emiratos Árabes Unidos. En este documento se hace un estudio y análisis sobre la tecnología de impresión 3D, donde se explica que ha evolucionado rápidamente para convertirse en uno de los campos tecnológicos líderes de las próximas décadas. Este estudio se enfocó en la industria de la construcción, destacando sus aspectos de sostenibilidad ambiental, financiera y social. Se demostró que esta tecnología ya está siendo utilizada en proyectos de construcción en los Emiratos Árabes Unidos (EAU), lo que representa una penetración temprana de la tecnología en el floreciente sector de la construcción del país. Además, se encontró que podría ser una alternativa sostenible con hasta un 49 % menos de huella ambiental y un 78 % más de rentabilidad en comparación con las técnicas de construcción convencionales (Ibrahim, Eltarabishi, Abdalla, & Abdallah, 2022). Sin embargo, el aspecto de la sostenibilidad social es el menos abordado y requiere mayor atención en futuras investigaciones. En general, esta tecnología está remodelando el futuro del entorno construido, especialmente en los casos en que es ventajosa, como diseños personalizados, entrega rápida de proyectos y construcciones orientadas a la sostenibilidad.

La tecnología ha impactado seriamente en la huella ambiental que involucra la industria de la construcción, y también hay documentos de investigación en torno a este tema. "Environmental

"Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House" es un artículo de investigación que evalúa el impacto ambiental y económico de construir una casa impresa en 3D a gran escala en comparación con los métodos tradicionales de construcción basados en hormigón. El estudio encontró que la casa impresa en 3D tenía una mayor eficiencia ecológica en comparación con la construcción a base de hormigón, con hasta el 90 % de los impactos ambientales en los morteros de impresión 3D mitigados al disminuir las proporciones de cemento. La investigación concluye que la tecnología de impresión 3D tiene el potencial de mejorar la economía y aliviar los impactos ambientales de la construcción (Hadeer Abdalla, 2021).

Este estudio respalda el creciente cuerpo de investigación sobre los beneficios de sostenibilidad de la tecnología de impresión 3D en la construcción. Otros estudios también han encontrado que la tecnología de impresión 3D puede reducir el desperdicio de materiales, el consumo de energía y las emisiones de carbono en comparación con los métodos de construcción tradicionales (Hadeer Abdalla, 2021).

En el contexto nacional el desarrollo de esta tecnología hasta la actualidad es escaso, pero no nulo, un ejemplo es "La Casa Origami", esta es una vivienda impresa en 3D y constituye el primer prototipo de su tipo en el país. Su área funcional es de 23.45 metros cuadrados y consta de una habitación, baño, sala comedor y cocina, que han sido precisamente ensambladas a partir de treinta y dos elementos impresos. El diseño se asemeja a una figura de origami modular, en la que varias piezas idénticas se unen para formar un modelo completo. Además, la casa está equipada con paneles solares y un sistema autónomo para la generación de energía (Concreto, 2021).

Cabe mencionar que, hasta el momento de creación de este documento, a nivel regional, en el departamento de Nariño, no se han encontrado avances significativos o trabajos de investigación que involucren la tecnología de impresión 3D en el sector de la construcción.

1.5.2. Marco teórico

1.5.2.1. Viviendas de interés social. Las viviendas de interés social en Pasto, Colombia, buscan ofrecer soluciones habitacionales y aseguren su habitabilidad, estándares de calidad en diseño urbano, arquitectura y construcción cuyo valor tope es el que se establezca en las normas que regulan la materia para este tipo de viviendas (Decreto reglamentario 1077 de 2015). Se presentan tres tipos de vivienda de interés social en Pasto (Ministerio de vivienda, 2022).

1.5.2.2. Vivienda de interés prioritario. Según el Decreto 1077 del 2015 Sector Vivienda y Desarrollo, las Vivienda de interés social prioritario (VIP) son una modalidad que busca garantizar el acceso a la vivienda a las personas más vulnerables del país, estas viviendas cuentan con una superficie mínima de 35 metros cuadrados y se construyen con materiales resistentes y duraderos; en Pasto, el gobierno municipal ha llevado a cabo programas de construcción de viviendas VIP, con el objetivo de brindar acceso a una vivienda digna a personas en situación de vulnerabilidad (Ministerio de vivienda, 2022).

1.5.2.3. Viviendas de autoconstrucción asistida. En el 2020, el Programa Nacional de Mejoramiento de Vivienda ha concluido que, las viviendas de autoconstrucción asistida son una modalidad de vivienda de interés social en la que las personas construyen sus propias viviendas con apoyo técnico y financiero del gobierno de Pasto, el programa de autoconstrucción asistida ha ayudado a muchas personas de bajos ingresos construir su propia vivienda, con el apoyo y asesoría del gobierno municipal; este modelo permite a las personas participar activamente en el proceso de construcción de su vivienda lo que les da un mayor sentido de pertenencia y les permite ahorrar costos.

Según el Artículo 12. Subsidio en especie para población vulnerable. Reglamentado por el Decreto Distrital 1921 de 2012, La Construcción de viviendas de interés social por parte del gobierno municipal busca brindar acceso a una vivienda digna a las personas de bajos ingresos, a través de la construcción de conjuntos residenciales y viviendas unifamiliares en algunos casos, el gobierno ha contado con el apoyo de entidades gubernamentales y no gubernamentales para la construcción de estas viviendas, también existe una forma de construcción de viviendas de interés

social por parte de las comunidades con base a la capacitación y acompañamiento continuo, según el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia ésta es una forma de construcción que ha ganado popularidad en Pasto, puesto que este modelo requiere que las personas de bajos ingresos se organicen en grupos para construir sus propias viviendas, con la asesoría técnica y financiera del gobierno y otras entidades, permite a las personas participar activamente en el proceso de construcción de sus viviendas y reducir los costos de construcción.

1.5.2.4. Impresión 3D. La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos años y ha revolucionado numerosas industrias. Esta tecnología posibilita la creación de objetos tridimensionales a partir de modelados digitales, a través de la deposición de capas superpuestas de material, el proceso de impresión 3D proporciona ventajas como la personalización, la reducción de costos y el acceso a diseños de alta complejidad que de no ser por esta tecnología serían de elaboración dispendiosa y tardía, cabe mencionar que existen diferentes tipos de impresión 3D, cada uno con sus propias características y aplicaciones. A continuación, se abordará los tipos de impresoras 3D según su diseño y su funcionamiento:

1.5.2.4.1. Cartesiana. Una impresora 3D cartesiana es "un tipo de impresora 3D que utiliza un sistema de coordenadas cartesianas para mover los ejes X, Y y Z de manera perpendicular entre sí. También se le conoce como una impresora 3D de movimiento lineal" (Prusa Research, 2021).

En este tipo de impresora, "la plataforma de impresión se mueve en el eje X y Y, mientras que el cabezal de impresión se mueve en el eje Z, permitiendo la creación de objetos tridimensionales capa por capa. Utiliza motores paso a paso para controlar los movimientos en cada eje y una estructura rígida para mantener la precisión durante el proceso de impresión" (Prusa Research, 2021).

Las impresoras 3D cartesianas son populares debido a su diseño simple y su capacidad para imprimir objetos de alta calidad con precisión. Además, son más fáciles de construir y ajustar en comparación con otros tipos de impresoras 3D (All3DP, 2022).

1.5.2.4.2. Delta. Una impresora 3D delta es "un tipo de impresora 3D que utiliza una estructura de brazos paralelos para controlar los movimientos de los ejes X, Y y Z" (Contreras, 2023). También se le conoce como una impresora 3D de geometría delta.

En una impresora 3D delta, "los brazos paralelos se extienden desde una plataforma móvil hacia una estructura fija en forma de torre. Los brazos están conectados a motores en la base y se mueven en coordinación para controlar el movimiento del cabezal de impresión. El cabezal de impresión se desplaza en el eje Z a lo largo de una columna vertical" (Contreras, 2023), mientras que los brazos paralelos se ajustan en longitud para determinar la posición del cabezal en los ejes X e Y.

Este diseño permite una gran velocidad de impresión y una alta precisión en la impresión de objetos cilíndricos o con formas curvas. Además, las impresoras 3D delta son conocidas por su capacidad para imprimir objetos de gran altura debido a la estructura vertical de los brazos.

Polar: Se le nombra de esta forma ya que funciona a través de coordenadas polares en lugar de coordenadas cartesianas. Este tipo de impresoras son poco comunes, funcionan con dos motores y el cabezal se posiciona en el extremo de un brazo móvil girando alrededor de un eje central.

En este tipo de impresoras se dan instrucciones de movimiento modificando el ángulo de giro y la distancia del eje central, de modo que la cama de impresión gira un ángulo determinado, el cabezal se aleja o se acerca al eje central y sube o baja.

1.5.2.4.3. Brazo robot. Hoy en día, hay muchos brazos robóticos que se utilizan para operaciones industriales en las líneas de montaje de automóviles. Sin embargo, su función principal es ensamblar piezas, no roscar. La impresión robótica aún está en desarrollo y solo unas pocas empresas la están implementando. Se utiliza principalmente en la industria de la construcción. Sin embargo, este método de fabricación aditiva FDM se está volviendo cada vez más popular ya que no requiere una cama fija y permite una mayor movilidad. La principal ventaja de la impresión 3D con brazos robóticos es una automatización más rápida y sencilla del proceso de fabricación. El movimiento del cabezal de extrusión también es extremadamente flexible, lo que abre nuevas posibilidades para proyectos complejos. Sin embargo, la calidad aún no es igual a la impresora Descartes y muchas empresas están trabajando en su desarrollo.

1.5.2.4.4. Core XY. Al igual que una impresora cartesiana, el diseño CoreXY tiene coordenadas de latitud y longitud determinadas por dos motores y la zona horaria en el eje Y o X, y la altura de impresión en el eje Z. La diferencia con Core XY es que X o Y dependen entre sí debido a la construcción especial de la zona. En este caso, la superficie de impresión aumenta hacia la extrusora. Recuerde que no es solo su superficie de impresión móvil lo que distingue a las impresoras CoreXY. La característica especial de este tipo de impresora es la zona XY y el diseño del mecanismo. Debido a que los ejes X e Y son mucho más livianos, las impresiones más rápidas están libres de los artefactos que pueden ocurrir en las impresoras cartesianas de alta velocidad. El diseño también permite que una proporción mucho mayor de la masa total sea masa de ensamblaje, ya que la superficie de ensamblaje no tiene que moverse lateralmente. Las correas utilizadas en las impresoras CoreXY son mucho más largas, lo que hace que cualquier problema con las correas sea más grave que en las impresoras Descartes. Su complejo camino también dificulta la solución de estos problemas. El marco debe ser muy estable y perfectamente equilibrado, de lo contrario, la precisión de la medición será menor.

1.5.2.5. Velocidad de Impresión. Las impresoras 3D tipo cartesiana ofrecen una velocidad significativa en la impresión, lo cual es beneficioso para proyectos de construcción de viviendas. La eficiencia en la producción se mantiene al imprimir rápidamente capas sucesivas de la mezcla de barro, arcilla y fibras vegetales (CEMEX, 2023).

1.5.2.6. Precisión. La alta precisión de las impresoras cartesianas es esencial para la construcción detallada y precisa de viviendas impresas en 3D. Garantizar la integridad estructural de las capas impresas es crucial para la durabilidad y estabilidad de la vivienda final (CEMEX, 2023).

1.5.2.7. Tamaño de Construcción. Las impresoras cartesianas, con sus considerables plataformas de construcción, facilitan la impresión de elementos de gran tamaño, como paredes y estructuras de viviendas. Es fundamental verificar las dimensiones específicas de la impresora para evaluar su idoneidad para proyectos de construcción a gran escala

1.5.2.8. Uso de Materiales. La versatilidad de las impresoras cartesianas permite la impresión con diversos materiales. En este caso, al emplear barro, arcilla y fibras vegetales, se logra una combinación única que ofrece propiedades mecánicas mejoradas. La selección precisa de estos materiales asegura resistencia y durabilidad, fundamentales en la construcción de viviendas (Yiming Peng, 2023)

1.5.2.9. Tipos de impresión 3D. Modelado por deposición fundida (FDM): este tipo de impresión 3D utiliza un filamento termoplástico que se alimenta a través de una boquilla caliente el material se deposita capa por capa para crear el objeto deseado, el FDM es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y facilidad de uso.

1.5.2.9.1. Estereolitografía (SLA). En este proceso, se utiliza un líquido fotosensible que se solidifica mediante la exposición a la luz ultravioleta una plataforma sumerge el objeto en el líquido y un láser o proyector de luz cura selectivamente las capas, creando así el objeto tridimensional, el (SLA) se destaca por su alta precisión y capacidad para imprimir detalles finos.

1.5.2.9.2. Sinterización Selectiva Por Láser (SLS). Este método utiliza un láser para fusionar partículas de polvo en capas sucesivas, el láser se dirige a puntos específicos del polvo, fundiéndose y creando así el objeto, permitiendo la utilización de una amplia variedad de materiales y es especialmente adecuado para la producción de piezas resistentes y funcionales.

1.5.2.10. Materiales de impresión 3D. Para la impresión 3D es importante la elección de su material pues de esto dependerá su resistencia, durabilidad y precisión los materiales más comunes en la Impresión 3D pueden ser los plásticos termoplásticos: estos materiales como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Ácido Poliláctico) son ampliamente utilizados en la impresión 3D debido a su bajo costo, facilidad de uso y disponibilidad en una amplia gama de colores, son adecuados para una variedad de aplicaciones, desde prototipos hasta productos finales; otro material importante son las resinas fotosensibles se utilizan resinas líquidas que se solidifican mediante la exposición a la luz ultravioleta, estas resinas ofrecen una alta precisión y permiten imprimir objetos con detalles finos y superficies suaves, existen diferentes tipos de resinas, como las estándar, flexibles y resistentes a altas temperaturas, lo que amplía las posibilidades de aplicaciones.

Otro material son las Poliamidas (Nylon) en este se utilizan polvos de poliamida que se fusionan mediante un láser, este material es conocido por su resistencia y durabilidad, y se utiliza en la producción de piezas funcionales y prototipos; también se pueden añadir rellenos de fibra de vidrio, carbono o metal para mejorar aún más las propiedades mecánicas y por último los metales como el aluminio, el acero inoxidable y el titanio, ha ganado popularidad en sectores como la industria aeroespacial y la automotriz estos materiales ofrecen una excelente resistencia y se imprimen mediante tecnologías como la fusión selectiva por láser (SLM) o la deposición de energía dirigida por electrones (DED).

La impresión 3D ha ido innovando y actualizando lo cual permite incluso la fabricación de estructuras complejas que antes eran difíciles o imposibles de lograr con métodos tradicionales, esto incluye la impresión de geometrías internas, estructuras reticulares y objetos con características micro o nano escala, abriendo la puerta a la creación de diseños optimizados y personalizados con propiedades mecánicas mejoradas y a nuevos modelos de impresión que tienden a la evolución como la Impresión 3D multi material en esta por ejemplo se está avanzando hacia la impresión 3D de objetos con múltiples materiales en una sola operación, esto permite la creación de componentes con diferentes propiedades físicas y químicas, como objetos flexibles combinados con partes rígidas y la capacidad de imprimir diferentes materiales en una misma pieza, así amplía las posibilidades de diseño y aplicaciones y también la Impresión 3D a gran escala

con la cual se están desarrollando tecnologías para la impresión como edificios y estructuras arquitectónicas estos sistemas utilizan robots o en otros casos impresoras de gran formato para depositar materiales de construcción capa por capa, lo que podría revolucionar la industria de la construcción al reducir costos y tiempos de producción así también se visualiza el auge de los materiales ecológicos que pueden llegar a ser utilizados en pro de la sostenibilidad incorporando tecnologías que mejoren su funcionamiento y valor sostenible tales como la madera; este es uno de los componentes históricamente más empleados presenta un impacto ambiental mínimo en su producción y ciclo de vida, asegurándose siempre de que tiene un origen certificado y sostenible, otro material interesante es celulosa obtenido a partir de papel desechado, por ejemplo, de periódicos reutilizados y tratados para obtener propiedades ignífugas, insecticidas y antifúngicas y por último el barro cocido es un material obtenido a partir de arcilla calentada a temperaturas elevadas al que se le aplican tratamientos naturales que favorecen sus propiedades, es sostenible debido a su fácil reciclaje y la reutilización de los residuos producidos en su elaboración.

1.5.3. Marco conceptual

1.5.3.1 Arcilla. La arcilla es un material terroso y versátil por su amplio uso en diferentes campos debido a sus propiedades únicas. Se caracteriza por estar compuesto principalmente por partículas minerales extremadamente pequeñas, normalmente inferiores a 0,002 mm. Estas partículas son principalmente silicato de aluminio hidratado, aunque la composición química de la arcilla puede variar mucho en función de su origen geológico y zona geográfica.

En un estudio científico sobre propiedades mecánicas de materiales de construcción, se investigaron las propiedades de una mezcla de ladrillo en tierra, arcilla, arena y fibras vegetales. La investigación reveló que la adición de fibras vegetales a la mezcla influye significativamente en sus propiedades mecánicas. La combinación de materiales naturales como tierra y arcilla con fibras vegetales no solo demuestra ser compatible, sino que también mejora la resistencia y durabilidad de los elementos de construcción. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de utilizar materiales compuestos en la construcción, destacando la importancia de considerar las propiedades mecánicas para garantizar la integridad estructural y la sostenibilidad en el diseño arquitectónico (Hanifi Binici, 2008).

Una de las características más notables de la arcilla es su capacidad para lograr plasticidad cuando se mezcla con agua, lo que la convierte en un material ideal para modelar y crear una variedad de formas. Esta propiedad maleable se ha explotado durante siglos en la industria cerámica, donde se moldea la arcilla para crear obras de arte, ladrillos, tejas y otros productos cerámicos. Además de la plasticidad, la arcilla tiene otras propiedades físicas importantes. Por ejemplo, tiende a encogerse cuando está seco y expandirse cuando está mojado, lo que puede causar problemas en la construcción y la agricultura si no se maneja adecuadamente. Además, la consistencia de la arcilla le permite conservar su forma después de ser moldeada y responder a la presión o tensión.

Las aplicaciones de la arcilla son muy diversas. Además de en utilizarla en la cerámica, también se utiliza en la construcción, donde se utiliza en la fabricación de ladrillos, tejas y como material de relleno y sellado en proyectos de ingeniería civil. Los usos en la construcción se deben a que la arcilla tiene propiedades idóneas para este tipo de estructuras, entre estas propiedades se destaca una absorción de agua fría de 1.75%, resistencia a la compresión entre 1,30 N/ a 1,43N/, un límite plástico del 51%, porosidad del 0.99%, límite líquido de Atterberg del 80.5%, estas propiedades cumplen con las especificaciones de la norma británica para ladrillos utilizados en edificios de 2 pisos y muros de carga sin carga (Akankpo & Stephen, 2016). En la agricultura, la arcilla afecta la capacidad de retener agua y nutrientes en el suelo, afectando directamente la calidad y productividad de los cultivos. La industria petrolera utiliza bentonita, un tipo de arcilla, como fluido de perforación al perforar pozos.

El procesamiento de la arcilla implica varios pasos, como extraer residuos, refinar para eliminar impurezas, mezclar con agua y otros materiales según la aplicación, dar forma a las piezas mediante fundición o extrusión y, en el caso de la cerámica, cocer a altas temperaturas para obtener solidez y resistencia producto final.

Es importante enfatizar que, en el contexto de la sostenibilidad y la protección ambiental, un buen manejo de la arcilla es esencial para prevenir la erosión del suelo y minimizar la degradación ambiental asociada con la minería y el procesamiento de la arcilla. Por lo tanto, existe un interés

creciente en la investigación e implementación de medidas sostenibles en la industria de la arcilla. En definitiva, la arcilla es un material valioso con amplias aplicaciones en muy diversos campos, desde la creación artística y la construcción hasta la agricultura y las industrias especializadas. Su versatilidad y propiedades únicas siguen siendo objeto de investigación e innovación en la búsqueda de soluciones eficaces y sostenibles (Pablo, 2023).

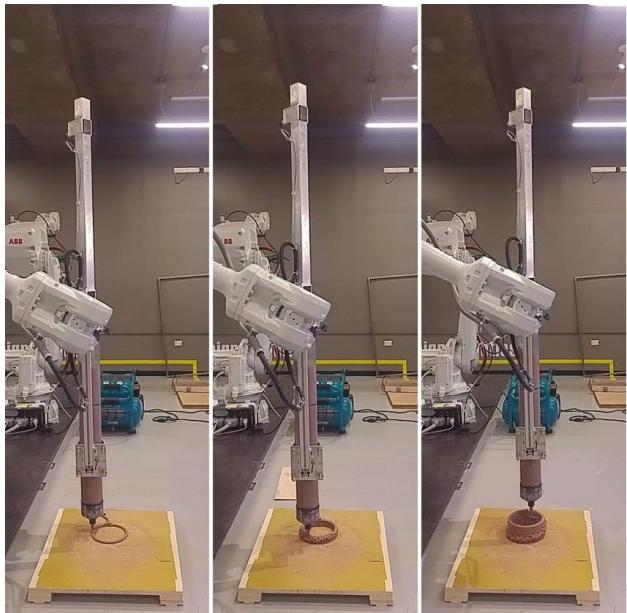
1.5.3.2. Extrusor. En las impresoras 3D que utilizan materiales de construcción, como el concreto, el extrusor es una parte crítica del proceso de impresión. El extrusor es el componente que se encarga de depositar el material de construcción capa por capa para crear la pieza impresa.

En el artículo "Design of a Screw Extruder for Concrete Printing" (Diseño de un extrusor de tornillo para impresión de concreto), se describe el diseño y la fabricación de un extrusor de tornillo para la impresión de concreto. El extrusor fue diseñado para manejar la alta viscosidad del concreto y para garantizar una deposición uniforme del material de construcción. Además, el artículo también describe la optimización de los parámetros de impresión, como la velocidad de extrusión y la presión, para lograr mejores resultados de impresión.

El diseño y la fabricación de un extrusor de alta calidad son fundamentales para garantizar una impresión precisa y de alta calidad en cualquier máquina de impresión 3D que utilice materiales de construcción, como el concreto (Bazalski, 2023).

Figura 1

Impresión 3d con un extrusor de arcilla.



Nota. Tomada de Righi, 2019. Arquitectura y ornamento: subjetividad orientada a los objetos y política del post-trabajo. Anales de Investigación en Arquitectura. 9. 65. 10.18861/ania.2019.9.2902.

Tomado

de.

https://www.researchgate.net/publication/334214226_Arquitectura_y_ornamento_subjetividad_orientada_a_los_objetos_y_politica_del_post-trabajo

Figura 2

Diseño de un prototipo de extrusor para impresión 3D.



Nota. La imagen muestra un prototipo de extrusor para impresión 3D. Tomado de *SolidWorks* Martínez M,A; Lagos S; Rosero X,A. 2023 elaboración propia.

1.5.3.3. Sistema CNC. Según la American Society of Mechanical Engineers (ASME), "una máquina CNC es un sistema que combina hardware y software para controlar, de forma automática y precisa, el movimiento de una herramienta de corte o una pieza de trabajo a través de una serie de movimientos predefinidos". Se caracteriza por su capacidad para seguir instrucciones precisas y complejas mediante el control de movimiento de los ejes de la máquina, los cuales son controlados mediante programas de software específicos. A través de la tecnología CNC, se logra una mayor precisión, repetibilidad y eficiencia en los procesos de fabricación.

El uso de máquinas CNC en la industria manufacturera ha revolucionado la forma en que se llevan a cabo los procesos de producción. Según la International Journal of Advanced Manufacturing Technology, "las máquinas CNC ofrecen una mayor flexibilidad, precisión y productividad en comparación con los métodos tradicionales de fabricación". Esto se debe a que las máquinas CNC permiten la automatización de tareas repetitivas y la ejecución de operaciones complejas con una mayor velocidad y exactitud.

Figura 3

La función más básica de cualquier máquina CNC es el control de movimiento automático, preciso y consistente



Nota. La imagen muestra el control numérico por computadora o mejor conocido como CNC. Tomado de Mike Lynch Founder and President, 2022.
https://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/cms/brand/mms-mex/2022-mms-mex/operadorcnc1-large_wide.jpg;maxWidth=1000;quality=70;format=webp

1.5.3.4. Sistema de bombeo. Un sistema de bombeo es un dispositivo utilizado para transportar materiales, como el concreto, a través de tuberías mediante el uso de una bomba de alta presión. Estos sistemas son ampliamente utilizados en la industria de la construcción para facilitar la colocación y distribución eficiente del concreto en proyectos de gran envergadura (Rivera, 2008).

La bomba de concreto es el componente central de este sistema y consta de una tolva de alimentación, un sistema de mezcla, una cámara de bombeo y una tubería de descarga. La tolva de alimentación es donde se carga el concreto, que luego se mezcla y se bombea a través de la cámara de bombeo mediante el uso de pistones o tornillos sin fin (Rivera, 2008).

La principal ventaja de utilizar un sistema de bombeo para el concreto es la capacidad de alcanzar áreas de difícil acceso o lugares de gran altura. Además, este sistema permite una distribución uniforme del concreto, evitando la segregación y garantizando una calidad de construcción consistente (Rivera, 2008).

Es importante destacar que la selección y diseño adecuado del sistema de bombeo depende de varios factores, como la distancia de bombeo, la consistencia del concreto, la altura de bombeo y la configuración del proyecto (Alarcón Linares, 2019).

Por lo tanto, se requiere un análisis cuidadoso de las necesidades específicas de cada proyecto para garantizar el rendimiento óptimo del sistema de bombeo.

Figura 4

Bombeo de hormigón para sistemas estructurales



Nota. La imagen muestra un sistema de bombeo para el transporte de hormigón. Fuente. MARTÍ, YEPES, & GONZÁLEZ, 2014. Fabricación, transporte y colocación del hormigón. Apuntes de la Universitat Politècnica de València. (189 pp).
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/04/05/bombeo-de-hormigon-para-sistemas-estructurales/>

1.5.3.5. Diseño mecánico. Es gracias a los conocimientos en ingeniería mecánica que podemos predecir con cierta exactitud los comportamientos de las estructuras y máquinas y que podemos diseñar éstas para que dichos comportamientos sean los requeridos. El proceso de diseño debe ser planeado adecuadamente para obtener resultados satisfactorios, ya que depende de muchos factores. Se tienen que tomar decisiones en cuanto a los materiales con que se construirán los elementos, geometrías, dimensiones, tratamientos termoquímicos y superficiales, métodos de manufactura y costos, entre otros (Vanegas Useche, 2018).

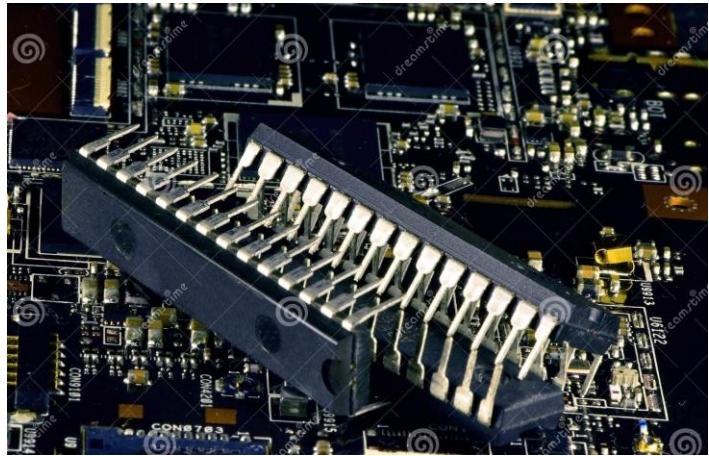
En término mecánicos, la impresora debe ser capaz de moverse con precisión en tres dimensiones para depositar el concreto de manera adecuada, también se debe considerar la resistencia y durabilidad de los materiales utilizados en la construcción de la máquina, ya que el concreto es un material pesado y puede ejercer una gran cantidad de fuerza sobre la impresora.

1.5.3.6. Diseño electrónico. Un circuito electrónico es un conjunto de componentes electrónicos interconectados que cumplen una función específica. para este caso se pueden implementar los siguientes componentes:

1.5.3.6.1. Microcontrolador. El microcontrolador es el cerebro de la impresora 3D. Es el encargado de controlar todos los componentes electrónicos, incluyendo los motores y los sensores. El microcontrolador también ejecuta el software de control y proporciona una interfaz para el usuario. Los microcontroladores comúnmente utilizados en impresoras 3D son el Arduino Mega o el Raspberry Pi.

Figura 5

Los microcontroladores en casos de plástico dip28 son muy inferiores en tamaño a la placa base del comprimido.

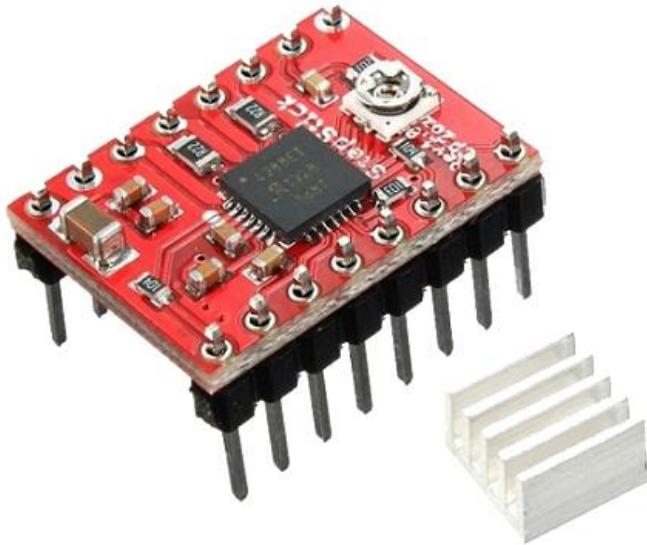


Nota. La imagen muestra 3 integrados dip 28 sobre un fondo de componentes microelectrónicos. Tomado de *DreamStime por Michael Ovseychik , s.f.* <https://es.dreamstime.com/los-microcontroladores-en-el-estuche-dip-son-ligeramente-inferiores-tama%C3%B1o-la-placa-base-del-tablet-casos-de-pl%C3%A1stico-muy-image233381551>

1.5.3.6.2. Drivers de motor. Los drivers de motor son los encargados de controlar los motores paso a paso que mueven los ejes X, Y y Z de la impresora 3D. Los drivers de motor más comunes son el A4988 o el DRV8825.

Figura 6

Driver A4988 con su respectivo disipador.



Nota. La imagen muestra un controlador de motor de paso A4988. Tomado de *Martínez M,A; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

1.5.3.6.3. Sensores. Los sensores son componentes importantes para el control de la impresora 3D. Los sensores de posición permiten al microcontrolador saber la posición de la cabeza de impresión en todo momento. Los sensores de temperatura y humedad permiten al microcontrolador monitorear las condiciones ambientales y ajustar la velocidad y la cantidad de concreto que se deposita en cada capa.

En el artículo "Design and Development of a 3D Printer with Multiple Sensors for Real-Time Monitoring of the Printing Process" (Diseño y desarrollo de una impresora 3D con múltiples sensores para la monitorización en tiempo real del proceso de impresión), publicado en la revista Sensors en 2019, se describe el diseño y la implementación de una impresora 3D con múltiples sensores para monitorear la temperatura, la velocidad de impresión y la cantidad de filamento restante. El uso de estos sensores permitió una mayor precisión y control durante el proceso de impresión, lo que resultó en una mayor calidad de las piezas impresas.

1.5.3.7. Fuente de alimentación. La fuente de alimentación proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de la impresora 3D. Se recomienda una fuente de alimentación de alta calidad y capacidad para asegurar que la impresora 3D funcione correctamente.

1.5.3.8. Software de control. El software de control es el encargado de interpretar los archivos de diseño y convertirlos en instrucciones para la impresora 3D. El software de control más comúnmente utilizado en impresoras 3D es Repetier-Host o OctoPrint.

En el artículo "Open-Source Software for Controlling Multiple 3D Printers" (Software de código abierto para controlar múltiples impresoras 3D), publicado en la revista IEEE Access en 2020, se describe un software de código abierto para controlar múltiples impresoras 3D. El software permite a los usuarios controlar varias impresoras 3D desde una sola interfaz, lo que facilita la administración y el monitoreo de múltiples impresoras. Además, el software también incluye características como la programación de trabajos, la monitorización en tiempo real y la generación de informes (Bas Wijnen, 2019).

1.5.3.9. Tarjeta electrónica. La tarjeta electrónica es el componente que conecta todos los componentes electrónicos de la impresora 3D. Las tarjetas electrónicas más comúnmente utilizadas en impresoras 3D son RAMPS 1.4 o MKS Gen L.

1.6. Metodología

1.6.1. Tipo de investigación

La investigación se llevará a cabo en el contexto de una investigación aplicada, centrada en el desarrollo de un prototipo de máquina CNC de impresión 3D para la construcción de viviendas de interés social en la ciudad de Pasto. En este tipo de investigación se aplican conocimientos científicos y prácticos para resolver un problema real.

1.6.2. Línea de investigación y sublínea del grupo de investigación

La línea de investigación en la que se enfoca el proyecto está enmarcada en la línea de investigación del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Mariana la cual es “Desarrollo Mecatrónico”, y la sub áreas de “Diseño de procesos y Productos” y “electrónica, automatización y control”, donde se aplicarán varias temáticas como diseño y desarrollo de sistemas de control para la máquina CNC de impresión 3D, investigación de software de control y programación necesaria para la operación del prototipo, implementación de sensores y actuadores para garantizar la precisión y calidad en la construcción, análisis de eficiencia energética y gestión de recursos en la operación. También integración de sistemas de seguridad y protocolos de emergencia en casos de fallas durante la impresión y evaluación de sistemas de monitoreo.

1.6.3. Hipótesis de investigación

La creación e implementación de un prototipo de impresora 3D para la construcción de viviendas en Pasto tendrá un impacto positivo en la reducción de los costos de construcción, los tiempos de entrega y la generación de residuos, lo que contribuirá a la promoción de viviendas asequibles y sostenibles en la ciudad, así como a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes

Hipótesis nula H0:

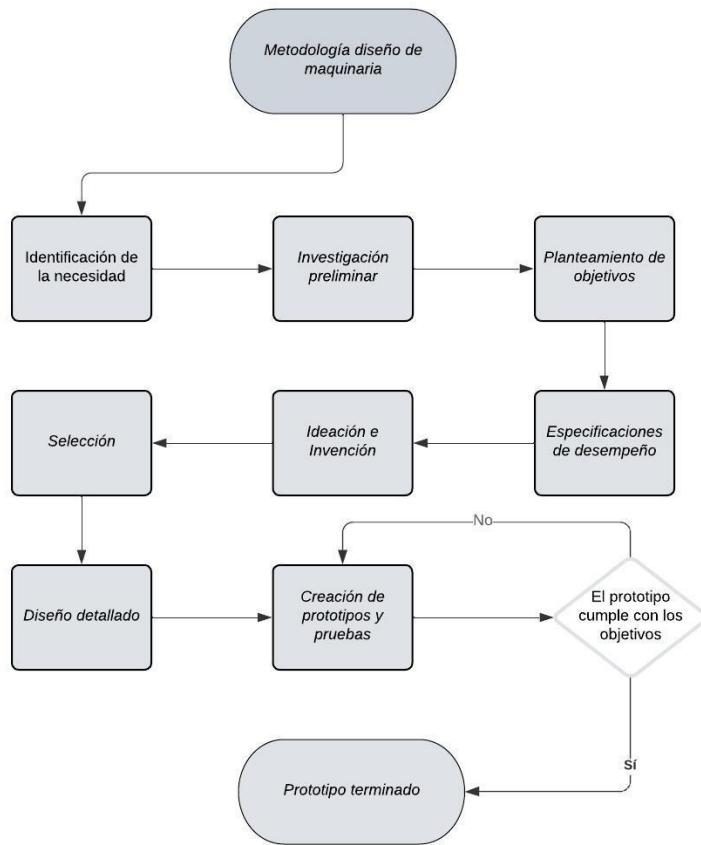
No hay viabilidad en términos técnicos y económicos de la construcción de casas de interés social en Pasto, Colombia, por medio de la creación de un prototipo de sistema CNC basado en impresión 3D ya que no tiene un impacto positivo, ni valioso.

1.6.4. Descripción metodológica

La metodología utilizada se basa en la descrita en el libro “Diseño de maquinaria – 4ta. Edición.” De Robert Norton. En el cual se indica una serie de pasos para un correcto diseño del prototipo. Esta metodología se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 7

Diagrama de flujo del proceso de diseño



Nota. La imagen muestra el diagrama de flujo del proceso de diseño enunciado en el libro “Diseño de maquinaria” de Robert Norton. Tomado de *Lucidchart Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Como se observa en el diagrama de flujo, para el desarrollo del primer paso se sugiere identificar la necesidad, que en el caso de este proyecto se enuncia en el planteamiento del problema. Posteriormente se realiza una investigación preliminar, descrita en el estado del arte. El tercer paso es el planteamiento de objetivos, que surge después de replantear el problema en forma de visualización funcional y de forma concisa, el resultado de este paso se observa en los objetivos del proyecto.

1.6.4.1. Identificación de la necesidad. Esta primera fase puede ser causada por la iniciativa de un superior o un cliente, quienes pueden expresar alguna necesidad de manera simple. Normalmente la afirmación es breve y carece de detalles.

1.6.4.2. Investigación preliminar. Esta fase es imprescindible en el proceso de diseño, debido a que se recopila información relevante sobre aspectos físicos, químicos y otros elementos relacionados con la necesidad. Esta fase no implica experimentos complejos. Norton plantea que es importante investigar si el problema o uno similar ya ha sido abordado previamente, ya que reinventar soluciones existentes puede resultar innecesario y costoso. Si se identifica una solución en el mercado, puede ser más eficiente adquirirla en lugar de desarrollarla desde cero. Se puede realizar un proceso de ingeniería inversa o “Benchmarking”, lo que puede implicar visitar sitios de patentes. Es importante dedicar tiempo y esfuerzo a esta fase para evitar desarrollar una solución que no resuelva el problema correcto.

1.6.4.3. Planteamiento de objetivos. Tras comprender a fondo el problema inicial, es importante reformularlo de manera clara y general, sin insinuar una solución concreta. El enunciado revisado debe enfocarse en los requisitos funcionales del problema. “Por ejemplo, cambie “Diseñar una mejor podadora de pasto” a “Diseñar un medio de acortar el pasto.” (Norton, 2008).

1.6.4.4. Especificaciones de desempeño. Consecuente a la comprensión del contexto y definición de los objetivos se puede proceder a establecer un conjunto de especificaciones de desempeño o especificaciones de tareas. Se advierte no confundir las especificaciones de desempeño con las especificaciones de diseño. “Las especificaciones de desempeño definen lo que el sistema debe hacer, mientras que las especificaciones de diseño definen cómo debe hacerse” (Norton, 2008). No se recomienda especificar el método para alcanzar el objetivo, sino delimitar el problema de forma clara permitiendo una solución efectiva que se pueda verificar.

1.6.4.5. Ideación e invención. En este paso toma parte el proceso creativo, utilizado para crear diversas ideas. “Se sugiere la técnica de juicio diferido que significa que su criticalidad deberá ser temporalmente suspendida” (Norton, 2008). En esta fase se realizan diseños potenciales. En un principio se plantea las diversas formas de robot que pueden servir como impresora 3d de viviendas, teniendo en cuenta que el prototipo es escalado. Esta fase se divide en dos, la primera parte se centra en las ideas y diseño de la estructura CNC, debido a que hay diversos tipos de robot, con diferentes tipos de articulaciones, actuadores, sistemas de transmisión de movimiento y potencia. Y la segunda parte se enfoca en la creación del extrusor.

1.6.4.6. Análisis. Posterior a la fase de ideación, la metodología de diseño de maquinaria plantea la fase de análisis. En esta fase se evalúan ciertos aspectos de alta importancia como son el desempeño del prototipo, que se ajuste al presupuesto destinado, la factibilidad de los diseños ideados, entre otros aspectos a evaluar. Cabe la posibilidad de emplear técnicas de análisis más elaboradas.

1.6.4.7. Selección. Consecutivo al análisis técnico en donde se identifican varias opciones de diseño viables, se requiere analizar comparativamente las alternativas posibles. Se pueden emplear matrices de decisión con el fin de ayudar a identificar la mejor opción, evaluando varios criterios de manera organizada.

Para la matriz de decisión se recomienda asignar criterios de evaluación como costo, eficiencia, facilidad de uso, entre otros. Además, se le asigna un peso a cada criterio, debido a que hay factores más críticos o menos críticos según se identifiquen las prioridades del usuario. Luego de acordar un peso para los criterios se procede a asignar puntuaciones a cada modelo teniendo en cuenta cada criterio de evaluación y su respectiva ponderación. Es pertinente aclarar que los resultados de esta matriz pueden ser subjetivos, por lo que se recomienda ser cauteloso con la interpretación de los mismos.

1.6.4.8. Diseño detallado. En general, Robert Norton describe esta etapa centrándose en la elaboración de un conjunto de planos de ensamblaje detallados, o archivos de diseño asistido por computadora (CAD) por cada pieza o componente del diseño. Estos planos deben estar acotados en su totalidad, especificando, del mismo modo, los materiales necesarios para fabricar cada una de las piezas. A partir de estos planos se construyen modelos físicos que posibiliten realizar pruebas físicas en las que eventualmente se revelen fallas que se pueden ajustar.

1.6.4.9. Creación de prototipo y pruebas. En el último paso de la metodología para el desarrollo del prototipo se encuentra esta fase, en donde, en cuanto al modelo se comprueban las correcciones de cualquier diseño hasta que se encuentre construido y evaluado, por lo que se suele requerir la construcción del modelo físico del prototipo. “Un modelo matemático, si bien es muy útil, nunca puede ser una representación completa y precisa del sistema físico real como un modelo físico, por la necesidad de simplificar las suposiciones” (Norton, 2008, pág. 12).

Los prototipos se crean para evaluar el desempeño del dispositivo sin tener que construirlo en escala real, pero los mismos conllevan sus propias dificultades con respecto a la escala real, como ejemplifica Norton (2008), el volumen del material puede cambiar con el cubo de las dimensiones lineales, sin embargo, la superficie cambia con el cuadrado, o la transferencia de calor al ambiente es proporcional al volumen.

Las pruebas del prototipo pueden hacerse observando el funcionamiento o instalando instrumentos que permitan medir la precisión de los desplazamientos, las velocidades, las fuerzas, el flujo de un material, la presión, o los distintos parámetros que se puedan medir en el dispositivo a través de sensores o similares.

1.6.4.10. Planificación del proyecto. La planificación del proyecto es indispensable para completar exitosamente el proyecto. Esta sección detallará minuciosamente las actividades para alcanzar los objetivos propuestos. Este enfoque sistemático permite identificar y organizar las actividades en torno a cada objetivo específico, siguiendo la metodología del diseño de maquinaria.

Entre otras utilidades de una correcta planificación está la organización, la optimización de tiempo y recursos, así como el garantizar la calidad del resultado final. La figura 9 describe las actividades elegidas y estas constan de tres tareas cada una, y un entregable por actividad.

Figura 8

Diagrama de actividades

Identificación de la necesidad	Definir el problema	Investigar materiales de construcción	Evaluar necesidades	Determinar limitaciones y definir alcance
Conceptualización	Generar alternativas de diseño	Evaluar opciones de estructura	Selección de modelo CNC y extrusor	Justificar matrices de selección
Diseño preliminar	Crear modelos CAD preliminares	Esquematizar el sistema de control	Definición de parámetros	Análisis de cargas
Análisis detallado	Simulación de CNC y Extrusor	Evaluar desempeño	Optimizar la estructura	Validar selección de materiales
Prototipo	Ensamble del prototipo	Integrar componentes eléctricos	Implementar software de control	Realizar calibraciones iniciales
Pruebas y validación	Imprimir estructuras de prueba	Medir precisión y calidad	Identificar problemas de funcionamiento	Realizar ajustes

Nota. La imagen muestra el diagrama de las actividades propuestas para el desarrollo del proyecto. Tomado de *Lucidchart Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

2. Presentación de resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo del prototipo a escala de la impresora 3d para la construcción de viviendas. Los resultados se mostrarán y compararán de acuerdo a los objetivos específicos planteados en el documento, estos incluyen también pruebas de funcionamiento, precisión en los movimientos, tiempos de impresión y secado, resistencia de las estructuras generadas, entre otros. Cada aspecto contribuye a evaluar y validar el diseño y eficiencia del prototipo.

2.1. Resultados del objetivo 1

El primer objetivo específico del proyecto se centra en la fase de investigación de tecnologías relacionadas con la impresión 3D en construcción, enfocándose en identificar materiales y componentes críticos para el desarrollo del prototipo. Por lo tanto, se comenzó planteando la pregunta orientadora: ¿Cómo desarrollar un prototipo de impresión 3D a escala para la construcción de vivienda en la ciudad de Pasto?

Para abordar esta interrogante, se investigaron distintas soluciones que han surgido en otros países, donde la impresión 3D en construcción lleva décadas de desarrollo, a diferencia de Colombia, donde aún se encuentra en etapas iniciales. La investigación permitió identificar diversos tipos de robots que cumplen funciones específicas en proyectos de impresión de viviendas. Estos robots incluyen impresoras de gran escala que pueden construir una vivienda completa en una sola configuración de trabajo, así como impresoras modulares que construyen viviendas por secciones o módulos. En el caso de los módulos, estos son impresos y luego trasladados al lugar de construcción final mediante grúas móviles. Un gran referente para este proyecto es TECLA, una iniciativa en el área de la sostenibilidad para crear una vivienda. El proyecto fue liderado por el arquitecto italiano Mario Cucinella y la empresa WASP. Esta innovación combinó “prácticas de construcción vernáculas, estudios climáticos, y principios bioclimáticos, junto con el uso de materiales locales” (Mario Cucinella Architects, 2021).

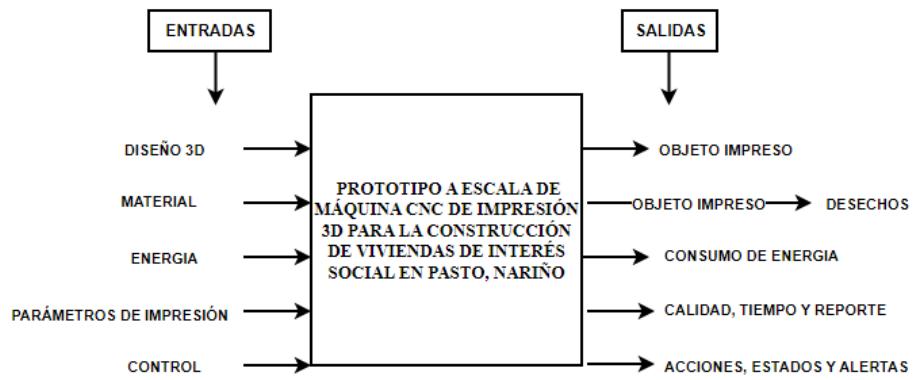
Este proyecto surgió para dar una solución a personas sin hogar, estudiando casos de viviendas en Mumbai y Sapporo. La arquitectura vernácula del prototipo de vivienda con muros de adobe tiene esa geometría para dar resistencia estructural sin necesidad de vigas o columnas. La forma de cúpula distribuye las cargas uniformemente por toda la estructura y distribuye las fuerzas de compresión desde la parte superior hasta la parte inferior de la cúpula. Esto evita la concentración de cargas en determinados puntos y reduce la necesidad de elementos de soporte adicionales.

Las estructuras de cúpula también son resistentes a factores climáticos adversos, como fuertes vientos y terremotos, porque su forma aerodinámica y su baja altura permiten que cargas laterales, como las provocadas por el viento, se deslicen por su superficie sin generar fuerzas capaces de desestabilizarla.

Además, este diseño maximiza el espacio interior al no requerir paredes interiores ni columnas de soporte, creando un ambiente espacioso y un uso eficiente de materiales, ideal para proyectos de construcción. El adobe, aunque duradero, puede ser menos resistente en estructuras rectangulares o cuadradas. Fue pertinente incluir un diagrama de caja negra que representa de manera simplificada la función global del prototipo. Este diagrama descompone el sistema en entradas y salidas principales, permitiendo identificar los elementos esenciales requeridos para el proceso de impresión 3D. Las entradas incluyen energía eléctrica, material de construcción (arcilla o barro) y las instrucciones de control, mientras que las salidas reflejan la estructura impresa y los datos de estado del sistema. Este enfoque facilita el análisis del flujo funcional y los requerimientos clave para optimizar el desempeño del prototipo.

Figura 9

Configuraciones de robots comunes en impresoras 3D de construcción



Nota. La figura muestra un diagrama caja negra de entradas y salidas del prototipo. *Figura de elaboración propia.*

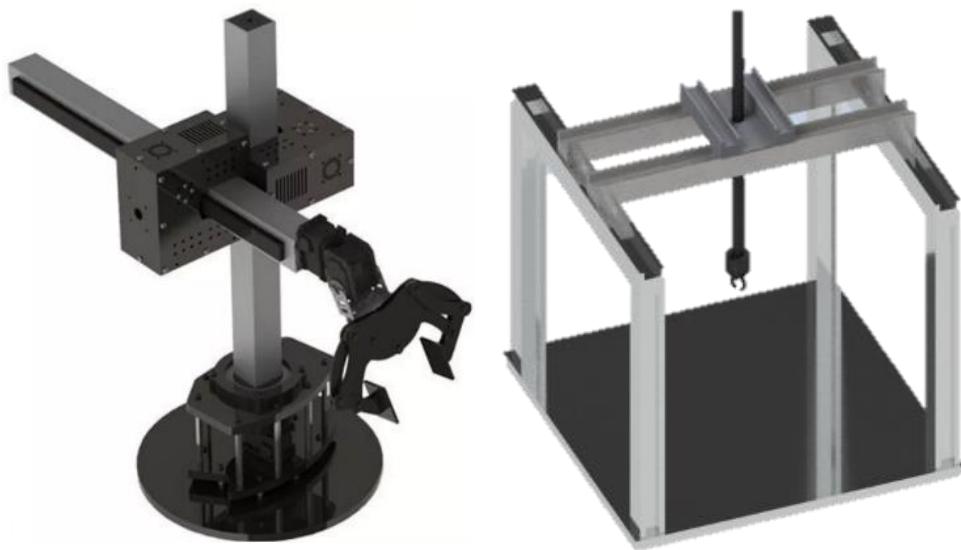
En cuanto a las configuraciones mecánicas observadas, predominan los robots con tres grados de libertad en una configuración de ejes prismáticos (robots cartesianos), aunque también se encontraron otros diseños que adaptan configuraciones cilíndricas. Cada una de estas soluciones aporta diferentes ventajas en términos de adaptabilidad y eficiencia en el proceso de construcción. Para estructurar el desarrollo del prototipo, el proyecto se dividió en tres componentes fundamentales, cada uno se detalla en los siguientes apartados.

2.1.1. Mecanismo CNC

Para desarrollar el mecanismo CNC del prototipo, se inició con la investigación de distintas configuraciones de control numérico por computadora que se emplean en aplicaciones de impresión 3D de gran escala. El objetivo fue definir un sistema que proporcionara precisión y estabilidad para imprimir estructuras de construcción. En el proceso investigativo se encontró que los modelos más utilizados en las impresoras de gran escala eran los modelos cartesianos (PPP) y los cilíndricos o cilíndrico (RPP/PPR)

Figura 10

Configuraciones de robots comunes en impresoras 3D de construcción



Nota. La imagen de la izquierda muestra un robot manipulador cilíndrico RPP y a la derecha se muestra un robot manipulador cartesiano PPP. Fuente *Grabcad, 2022 por Horner, N.*

Las configuraciones de 3 ejes prismáticos (PPP) y 1 eje rotacional y 2 prismáticos (RPP) tienen propiedades distintas que proporcionan ciertas ventajas y desventajas en el ejercicio de sus aplicaciones. Algunas de éstas se mencionan en la siguiente tabla.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de un robot cartesiano y cilíndrico.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CARTESIANO (PPP)	Al tener una configuración de 3 ejes prismáticos los modelos directos e inversos (M.G.D y M.G.I) son más sencillos, sin dejar de ser precisos.	Aumentar el espacio de trabajo geométricos estructurales más complejas de realizar.

	<p>La estructura cartesiana tiene mayor rigidez y estabilidad.</p>	<p>Generalmente demanda un espacio físico mayor en contraste con otras configuraciones. La estructura suele expandirse considerablemente si se requieren áreas de trabajo grandes.</p>
CILÍNDRICO (RPP)	<p>El mantenimiento de estos modelos suele ser más fácil de realizar porque tiene menos componentes complejos que los mecanismos que tienen ejes rotacionales.</p>	<p>Los sistemas lineales suelen sufrir un mayor desgaste a causa de la fricción y la carga constante en un único tipo de movimiento.</p>
	<p>Con un eje rotacional es posible lograr alcanzar ángulos y direcciones que no se pueden conseguir con 3 ejes prismáticos.</p>	<p>Los modelos geométricos directos e inversos son más complejos de configurar, por lo que la precisión se puede ver comprometida causando errores acumulativos que impactan los resultados finales.</p>
	<p>Se puede alcanzar un área de trabajo mayor, con una estructura que ocupa menos espacio.</p>	<p>La inclusión de MGD y MGI particulares suelen ser incompatibles con softwares de calibración y operación comunes. Por lo que es necesario crearlos desde cero.</p>

La rotación facilita la creación de geometrías compuestas o no alineadas, lo que resulta beneficioso en edificaciones que requieren detalles diversos ángulos. El eje rotacional puede aumentar las vibraciones en el sistema y complicar la rigidez estructural, especialmente en estas aplicaciones que requieren soportar altas cargas.

Nota. La tabla muestra la comparación de ventajas y desventajas de las configuraciones de robot cartesiano y cilíndrico. *Tabla de elaboración propia.*

El mecanismo de la CNC es el eje central del prototipo, ya que su configuración y exactitud son cruciales para un correcto desempeño del mismo, dentro del proceso de la impresión. La definición de la estructura va de la mano con otros dos puntos críticos del diseño del prototipo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la primera especificación de desempeño previa a esta fase es la propuesta en el objetivo general, que delimita la escala del prototipo a 1:10. Por lo tanto, el mecanismo debe tener en cuenta este factor. Fue necesario investigar las tecnologías similares en el tamaño mencionado para recoger información que pudiera ser de utilidad para el diseño y desarrollo. Las impresoras 3d de filamento son las más comunes en el mercado, sin embargo, su estructura está diseñada para soportar cargas de un peso bajo, y la mayoría cuenta con camas móviles a excepción de ciertas impresoras tipo core XY o las impresoras Delta.

Figura 11

Impresora Creality V3



Nota. La imagen muestra una impresora Creality V3 y los movimientos de sus ejes haciendo énfasis en la inclusión de la cama móvil en el eje Y. Fuente Creality, 2024
<https://www.creality.com/es/products/ender-3-v3>

Las estructuras de estas impresoras comerciales cuentan en su mayoría con perfiles de aluminio estructural, tipo V-Slot o T-Slot. En cuanto a los actuadores se suelen utilizar motores de paso debido a su precisión y control de movimiento en los diferentes ejes. Entre los motores de paso más usados se encuentran los motores NEMA 17, se utiliza para los ejes X, Y, Z e incluso para los extrusores. Son ideales gracias a su tamaño reducido y torque adecuado para un buen desempeño en la impresión. Otros motores que se utilizan en algunos diseños son los NEMA 23. Estos motores son más potentes que los NEMA17, también tienen mayor torque y tamaño. El torque las hace ideales para trabajos más pesados, soportar cargas más grandes o realizar movimientos que requieran más esfuerzos. Son comúnmente utilizados en máquinas industriales o CNC de corte.

2.1.2. Extrusor

Otro componente crítico a tener en cuenta es el extrusor. Esta parte es la que depositará el material capa por capa para construir las estructuras finales. Por ende, se investigaron los distintos avances que existen en máquinas adaptadas a materiales de construcción y su viscosidad. En la investigación se encontró que las características del extrusor deben hacerlo apto para manipular los materiales de construcción garantizando un flujo constante y homogéneo para asegurar la calidad de las estructuras definitivas. Para cumplir con estos requisitos se examinaron los diferentes tipos de extrusores empleados en proyectos parecidos, que van desde los extrusores de tornillo sinfín hasta los de pistón. Cada tipo posee propiedades particulares: por ejemplo, los extrusores de tornillo sinfín se destacan por su habilidad para combinar y conservar una presión constante en el movimiento de material, lo que resulta esencial para la uniformidad y resistencia de las capas de material en la edificación. En contraposición, los extrusores de pistón proporcionan exactitud en la aplicación del material, aunque pueden tener restricciones respecto a la velocidad de extrusión.

Otra característica estudiada fue el sistema de energía del extrusor. Este debe ajustarse al tipo de material que se va a emplear y al tamaño del prototipo, por lo que se investigaron opciones de alimentación continua a través de bombas de materiales y recipientes a presión. En el proceso de investiga

Además, se investigaron diversos tipos de extrusor, algunos extrusores cuentan con el sistema de almacenamiento de la mezcla y el sistema de extrusión en una sola pieza, otros modelos cuentan con un sistema de almacenamiento apartado del sistema de extrusión montado en el eje Z de los robots. La mayoría de los extrusores hallados tienen máquinas extras que ayudan a realizar la mezcla de los materiales como concreto, mortero y otros aditivos para posteriormente agregar la mezcla por medio de una tolva al dispositivo de almacenamiento. Como se ha mencionado anteriormente, los actuadores tienen distintos tipos de transmisión de potencia y transmisión de movimiento. Varios sistemas de extrusión cuentan con engranajes como mecanismos de transmisión de potencia, también se encuentran mecanismos con correas dentadas, mecanismos de tornillo sin fin y corona, entre otros. Por otro lado, entre los sistemas de transmisión de movimiento

de la mezcla predominan 3, el primer sistema es el de tornillo sin fin, que se ubica dentro del tanque de almacenamiento y con el movimiento del actuador, en el caso de los extrusores de una pieza, mueve la mezcla hacia la boquilla que deposita directamente el material. En el caso de los extrusores de dos piezas, el material es empujado a través de tuberías o mangueras que conectan con la otra pieza de extrusión o boquilla que deposita el material por capas.

2.1.3. Material

La extrusión del material es un desafío para la impresión 3D, principalmente con materiales como la arcilla ya que las propiedades reológicas afectan la fluidez y la calidad de las piezas impresas, para el estudio del material a usar se llevó a cabo una investigación donde se compararon dos mezclas diferentes, con el objetivo de mejorar las propiedades del material.

2.1.4. Especificaciones de desempeño

Como se describió en la sección de metodología, la fase de especificaciones de desempeño hace parte del diseño de maquinaria, y también hace parte del primer objetivo específico del proyecto. Y esta fase es crucial para garantizar que el desarrollo del prototipo cumpla con los requisitos del proyecto, de modo que se establecieron criterios de rendimiento para describir las capacidades y limitaciones deseadas del sistema de impresión 3D.

Estas especificaciones sirven como parámetros clave que guiarán las próximas etapas del diseño y evaluación del prototipo. Además, sirven como pautas básicas durante el desarrollo de prototipos, definiendo con precisión los resultados funcionales que el sistema debe lograr. Es importante

Después de la fase de investigación, se desarrollaron especificaciones de desempeño para garantizar que el prototipo cumpliera con los requisitos técnicos y contextuales de la construcción 3D. Estas reflejan los hallazgos de la investigación y garantizan que el sistema mantenga los estándares necesarios para operar de manera efectiva en entornos del mundo real, del mismo modo resaltan el enfoque innovador y los desafíos específicos de la impresión 3D en la construcción en el contexto colombiano. Estas especificaciones son importantes para garantizar que cada

componente y proceso sea coherente con el rendimiento esperado y las condiciones operativas definidas.

2.1.4.1. Especificación de dimensión. Fruto de la fase de investigación, establecimos como primera especificación que el área de trabajo máxima de nuestro prototipo debe ser de 40 centímetros en el eje X y Y, y de 30 centímetros de alto en el eje Z. Esta especificación responde a la necesidad de desarrollar una impresora capaz de producir estructuras por secciones, permitiendo la fabricación modular de componentes de construcción.

Al limitar las dimensiones de la impresión, el diseño se hace más manejable y portátil, lo cual resulta ideal para la experimentación y facilita el transporte y ensamblaje en diferentes entornos. Adicionalmente, esta restricción en las dimensiones permite concentrar los recursos y esfuerzos en optimizar el rendimiento y precisión en un volumen de trabajo realista, maximizando la eficiencia de la máquina y asegurando que cada componente cumpla con los estándares de resistencia y calidad necesarios.

2.1.4.2. Especificación de sistema de extrusión. Es esencial especificar un sistema de extrusión apropiado, ya que el material de moldeo elegido (arcilla y barro) tiene propiedades que pueden causar desafíos específicos, como evitar la eventual obstrucción del flujo del sistema.

Este sistema de extrusión debe procesar el material adecuadamente para garantizar una salida continua, uniforme e ininterrumpida, lo cual es esencial para la integridad de la estructura impresa. Además, el flujo constante minimiza la posibilidad de defectos estructurales que podrían afectar la durabilidad de los módulos una vez secos.

Elegir el sistema de extrusión adecuado también permite ajustar los caudales en función de las propiedades específicas del material, lo que mejora la precisión y la capacidad de entrega del proyecto.

2.1.4.3. Facilidad de limpieza del extrusor. Es fundamental que el sistema de extrusión facilite la limpieza y el mantenimiento para evitar la acumulación de material seco o endurecido. La acumulación puede afectar la regularidad del flujo y la durabilidad del sistema, lo cual es costoso y requiere una intervención de ingeniería continua. Por esta razón, es importante que los componentes del sistema de extrusión puedan desmontarse fácilmente para su limpieza sin necesidad de procesos complicados ni herramientas especializadas. Esto reducirá el tiempo de mantenimiento y optimizará el uso del equipo a lo largo de su vida útil.

2.1.4.4. Sistema de almacenamiento de material. El prototipo debe contar con un sistema de almacenamiento de material que permita su recarga de forma sencilla y ágil, especialmente considerando que los proyectos de impresión 3D en construcción tienden a consumir cantidades considerables de material. Esta facilidad de recarga es importante no solo para asegurar un flujo continuo de trabajo, sino también para permitir a los operarios mantener la impresora en funcionamiento de forma prolongada sin complicaciones. Además, el sistema de almacenamiento debe ser compatible con el material seleccionado y debe evitar problemas de segregación o sedimentación que puedan obstruir el flujo de arcilla o barro.

2.1.4.5. Sostenibilidad del material. Uno de los objetivos clave del proyecto es que el material de construcción sea una opción sostenible, tanto desde una perspectiva ecológica como económica. El uso de materiales como arcilla y barro representa una ventaja significativa en términos de sostenibilidad, ya que son naturales, renovables y de bajo impacto ambiental. Esta especificación no solo se alinea con las tendencias globales hacia la construcción ecológica, sino que también abre la posibilidad de aplicar el prototipo en proyectos de bajo costo como son las viviendas de interés social, donde los materiales sostenibles y accesibles pueden ser altamente valorados.

2.1.4.6. Restricción presupuestaria. Finalmente, el desarrollo del prototipo debe realizarse dentro de un presupuesto máximo de 4.500.000 pesos colombianos. Esta limitación es un aspecto fundamental que guía la selección de componentes, materiales y procesos de fabricación en todas las etapas del proyecto. Al trabajar bajo un presupuesto definido, se impulsa un enfoque de diseño eficiente y una toma de decisiones rigurosa que prioriza la funcionalidad esencial y la calidad sin exceder los recursos asignados.

2.2. Resultados de objetivo 2

El segundo objetivo específico de este proyecto consiste en desarrollar un diseño de prototipo de impresora 3D, apto para construcción a pequeña escala y basado en especificaciones de rendimiento previamente establecidas. Durante esta fase, el objetivo es traducir los resultados de la investigación en soluciones técnicas y estructurales que permitan que la máquina funcione de manera eficiente y cumplan con los requisitos de precisión, durabilidad y facilidad de uso.

Este diseño representa una integración de dimensiones, procesos de extrusión y especificaciones de selección de materiales, analizados para optimizar la función de cada pieza de la máquina. Los resultados describen tanto los aspectos estructurales y mecánicos como los desafíos y adaptaciones que surgieron durante la conceptualización del prototipo, para que este diseño cumpla con los requisitos de sostenibilidad y eficiencia en la construcción de estructuras modulares. Es importante mencionar que la estructura de estos resultados se obtuvo conforme a las actividades planteadas y a su vez a la metodología descrita para el diseño de maquinaria, aunado a esto también se siguió subdividiendo las fases teniendo en cuenta los 3 componentes críticos del proyecto.

2.2.1. Resultado de creación e invención

En la fase de diseño y creación, el equipo de trabajo inició con una sesión de lluvia de ideas, orientada a generar múltiples alternativas para el sistema CNC, el extrusor y los materiales adecuados para el prototipo de la impresora 3D de construcción. Se exploraron un total de 40 propuestas de prototipos que abarcaron desde enfoques más modulares y versátiles, como

impresoras con capacidad para ensamblarse en distintas configuraciones, hasta impresoras de gran escala y brazos robóticos especializados.

Las ideas abarcaron diversas arquitecturas y sistemas de impresión, incluyendo robots SCARA, sistemas Core XY, y extrusores que integran técnicas innovadoras, como el uso de presión de aire para asegurar el flujo continuo del material de construcción. Otra propuesta incluyó un extrusor de almacenamiento vertical, ubicado en el eje Z, además de considerar el uso de una tolva donde se depositaría la mezcla inicial del material. Dentro de los materiales, se sugirieron varias composiciones, incluyendo la mezcla de mortero o arcilla, y sistemas de bombeo de agua que permitirían la preparación de la mezcla directamente antes del proceso de extrusión.

El análisis y discusión de estas alternativas se tradujo en un gráfico conceptual que organiza las principales propuestas, clasificándolas en función de su aplicabilidad y viabilidad dentro de los parámetros del proyecto. Este gráfico sirve como base visual para evaluar y comparar las opciones generadas, permitiendo al equipo una toma de decisiones más informada en los siguientes pasos del proceso de diseño.

Figura 12

Lluvia de ideas de prototipos de impresora 3d para construcción



Nota. La imagen muestra 4 resultados de la lluvia de ideas con la descripción de cada una,
Figura de elaboración propia.

2.2.2. Resultado de análisis

En la fase de análisis, se evaluaron de forma exhaustiva las opciones generadas para la estructura del sistema CNC, el extrusor y el material propuesto, basándose en los resultados de la fase de creación e invención y en la investigación preliminar realizada. Dado el amplio número de alternativas planteadas, fue necesario un proceso riguroso de filtrado, ya que algunas opciones, aunque creativas, resultaron poco viables al considerar las especificaciones de desempeño definidas en el primer objetivo del proyecto.

Este análisis permitió comparar cada alternativa de acuerdo con criterios específicos, como el ajuste al presupuesto disponible, la viabilidad técnica, la simplicidad de implementación y la capacidad para cumplir con los parámetros de desempeño críticos. Así, se identificaron aquellas opciones que mejor se ajustan a los objetivos del proyecto, facilitando una selección basada en datos precisos y en la compatibilidad con los requisitos de funcionalidad, sustentabilidad y costos del prototipo de impresora 3D.

Teniendo en cuenta las especificaciones de desempeño del prototipo, se llevó a cabo una investigación exhaustiva para identificar y analizar los diferentes actuadores, sistemas de transmisión de potencia y mecanismos de transmisión de movimiento empleados en prototipos similares y en productos comerciales afines. Esta revisión detallada fue clave para comprender las ventajas, limitaciones y condiciones de funcionamiento de cada componente en función de las características específicas de nuestra impresora 3D de construcción.

La investigación incluyó el análisis de distintas configuraciones de actuadores, tales como motores paso a paso y motores servo, valorando aspectos como su precisión, eficiencia, facilidad de control y capacidad de respuesta en aplicaciones de construcción a escala. Además, se evaluaron sistemas de transmisión de potencia que pudieran asegurar un movimiento fluido y confiable, como

tornillos sin fin, engranajes helicoidales y correas de transmisión, considerando sus implicaciones en términos de precisión, durabilidad y mantenimiento.

Para el sistema de empuje de material, se investigaron diversas tecnologías empleadas en robots industriales y en impresoras de gran formato, evaluando su aplicabilidad en un prototipo diseñado para construir estructuras modulares. Esta fase de investigación fue fundamental para identificar las mejores opciones que podrían integrarse en el diseño del prototipo, alineando cada componente con las necesidades específicas de desempeño establecidas y los desafíos inherentes al uso de materiales como la arcilla y el barro en la construcción.

2.2.2.1. Actuadores empleados en sistemas CNC. Los actuadores son una parte principal de los mecanismos robóticos. Su función es realizar los movimientos de los eslabones de los robots según los comandos de accionamiento que le proporciona los microcontroladores. “Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Las características a considerar son entre otras: Potencia, controlabilidad, peso y volumen, precisión, velocidad, mantenimiento y coste” (Peñín, Barrientos, Balaguer, & Aracil, 1997). En la actualidad, los robots industriales suelen utilizar actuadores eléctricos debido a su facilidad de control y precisión. Entre los más comunes se encuentran los motores de corriente continua (DC), los motores de corriente alterna (AC), los servomotores y los motores paso a paso. Sin embargo, en prototipos de menor escala, como el especificado en este proyecto, los actuadores más empleados son los servomotores y los motores paso a paso, debido a su capacidad para ofrecer control preciso y fiable en sistemas de tamaño reducido. Por lo tanto, se consideró estos dos tipos de actuadores eléctricos para la implementación de estos en el sistema CNC.

2.2.2.2. Transmisiones y reductores en sistemas CNC y sistemas de bombeo. Para el sistema de bombeo y la transmisión de potencia de los actuadores es necesario considerar los distintos tipos de transmisión y reductores, ya que se deben incluir en las siguientes fases de diseño. En cuanto a los sistemas de transmisión se utilizan dado que es imprescindible reducir el momento de inercia y que los actuadores puedan trasladar el movimiento a las articulaciones. En cuanto a los sistemas de transmisión se tuvo en cuenta las ventajas e inconveniente resultado de investigaciones (Peñín, Barrientos, Balaguer, & Aracil, 1997), estipuladas en la tabla 2.

Tabla 2

Ventajas y desventajas de sistemas de transmisión para robots

Entrada - Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular - Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Correa dentada	Distancia grande	Resistencia
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitado
	Cable	-	Deformabilidad
Circular - Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal - Circular	Paral articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Nota. La tabla muestra la comparación de ventajas y desventajas de los 3 sistemas de transmisión más frecuentes para robots. Fuente *Fundamentos de robótica*. (1997), Barrientos, A. Peñin, L, Balaguer, C. & Arcil, R.

En los robots no hay una preferencia estricta de un sistema de transmisión particular, sin embargo, las que predominan son las que cuentan con movimiento circular. Por otro lado, en los reductores sí hay sistemas preferidos en robots industriales ya que estos deben tener un tamaño compacto, bajo rozamiento y una alta reducción de velocidad. “También existe una limitación en cuanto al par de salida nominal permisible () que depende del par de entrada (y de la relación de

transmisión a través de la relación:" (Peñín, Barrientos, Balaguer, & Aracil, 1997). En donde es el rendimiento que puede ser 100%, y la reducción de velocidades varían entre 50 y 300. En el caso de elegir un sistema de empuje de mezcla electromecánico, la inclusión de reductores es necesaria debido a que, por la viscosidad de las mezclas, es importante tener un alto torque.

2.2.2.3. Análisis de opciones de morfología del robot. En el análisis preliminar de las alternativas estructurales desarrolladas durante la fase de invención, se empleó un primer filtro para seleccionar las opciones más adecuadas. Este filtro consideró aspectos clave, como los actuadores analizados previamente, las configuraciones predominantes en sistemas CNC de esta naturaleza y los sistemas de transmisión comúnmente empleados en robótica. Estos criterios se integraron con las especificaciones de desempeño del prototipo, lo que permitió identificar las opciones más prometedoras para cumplir con los objetivos del diseño. Así, se evaluaron detalladamente las alternativas para decidir cuáles serían las más viables en función de su rendimiento potencial y adecuación a los requerimientos del proyecto.

2.2.2.3.1. Alternativa 1: robot cilíndrico con 3 GDL. Este robot presenta una configuración RPP, en la cual el primer actuador se encuentra en la base y permite un movimiento rotacional en la primera articulación. Los otros dos actuadores se localizan en las articulaciones prismáticas, uno de estos perteneciente al eje Z, permitiendo desplazamientos lineales en dirección vertical y horizontal. En esta configuración, el extrusor se sitúa en el extremo final del brazo robótico, lo que facilita el posicionamiento y precisión necesarios para el proceso de impresión o aplicación de materiales, adaptándose eficazmente al diseño de este sistema.

Figura 13

Ejemplo de alternativa 1 robot cilíndrico RPP

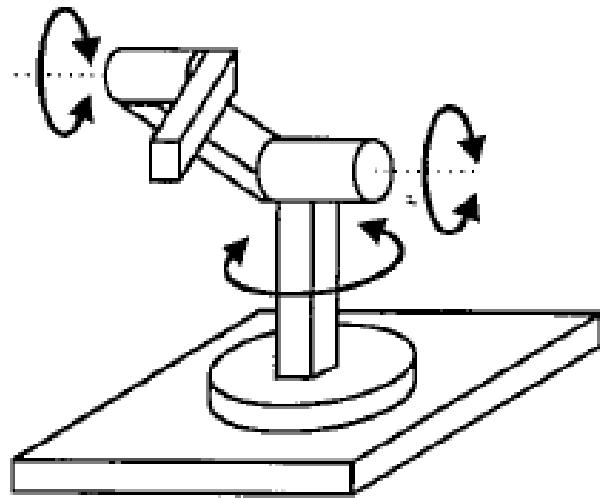


Nota. La figura presenta un robot PlateCrane como ejemplo de la alternativa de morfología con 3 grados de libertad y una configuración RPP. Tomado de *Laboratory equipment. (S.f), Terra universal*. <https://www.laboratory-equipment.com/platecrane-ex-ex360.html>

2.2.2.3.2. Alternativa 2: Robot antropomórfico con 3 GDL. Este robot tiene una configuración cinemática de tres grados de libertad (RRR), donde cada articulación está impulsada por un actuador rotacional. Esta disposición le permite realizar movimientos circulares en cada una de sus uniones, facilitando una gran flexibilidad y precisión en el espacio tridimensional. Además, el extrusor, que es el dispositivo encargado de depositar el material de construcción, está colocado en el extremo del brazo robótico, permitiendo que este pueda orientarse y posicionarse de manera óptima para el proceso de impresión o deposición de materiales en el lugar deseado.

Figura 14

Ejemplo de alternativa 2 robot antropomórfico RRR

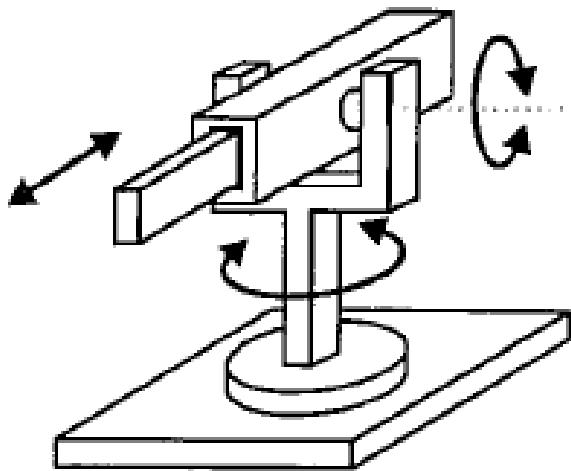


Nota. La figura muestra la configuración de robot antropomórfico o angular RRR. Tomado de *Fundamentos de robótica*. (1997), Barrientos, A. Peñin, L. Balaguer, C. & Arcil, R.

2.2.2.3.3. Alternativa 3: Robot polar con 3 GDL. Este robot tiene una configuración RRP, ofreciendo 3 grados de libertad mediante dos actuadores rotacionales ubicados en las dos primeras articulaciones y un actuador prismático en la última. Esta disposición permite movimientos angulares en las primeras dos articulaciones, facilitando la orientación del brazo, mientras que el tercer actuador proporciona desplazamientos lineales en el eje final. El extrusor se sitúa en el extremo del brazo robótico, optimizando su capacidad para colocar el material en la posición requerida con precisión.

Figura 15

Ejemplo de alternativa 3 robot cilíndrico RRP

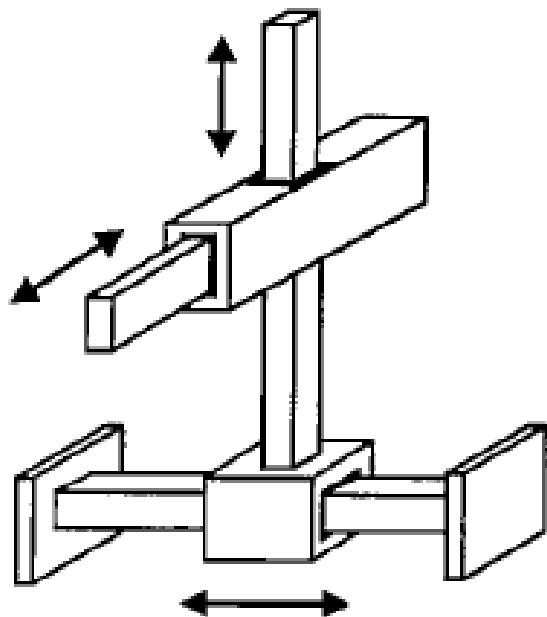


Nota. La figura muestra la configuración de robot polar o esférico RRP. Tomado de *Fundamentos de robótica*. (1997), Barrientos, A. Peñin, L, Balaguer, C. & Arcil, R.

2.2.2.3.4. Alternativa 4: Robot cartesiano con 3 GDL. Este robot cartesiano tiene una configuración PPP, también conocido como robot de coordenadas rectangulares, tiene una estructura que se basa en tres ejes perpendiculares entre sí: el eje X, el eje Y y el eje Z. Esta configuración permite que el robot se desplace en línea recta a lo largo de cada uno de estos ejes, proporcionando movimientos precisos y controlados. En este tipo de robot, se utilizan actuadores lineales, para controlar el movimiento en cada uno de los ejes, lo que permite una gran precisión y repetibilidad en la ubicación del extrusor o herramienta en el espacio tridimensional. El extrusor se monta en el extremo del eje Z, permitiendo que se mueva verticalmente y realice la extrusión del material con alta precisión a lo largo de los ejes X y Y.

Figura 16

Ejemplo de alternativa 4 robot cartesiano PPP



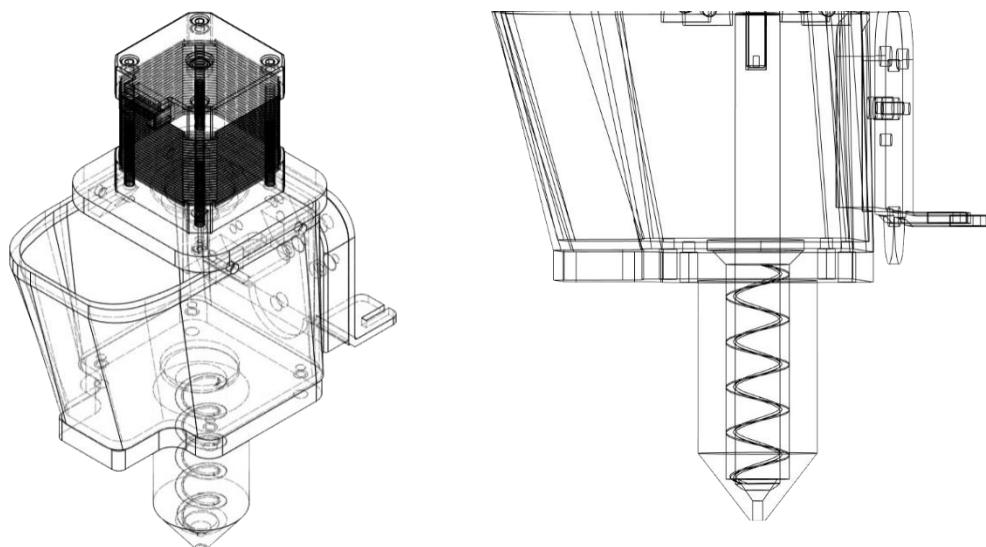
Nota. La figura muestra la configuración de robot cartesiano PPP. Tomado de *Fundamentos de robótica*. (1997), Barrientos, A. Peñin, L. Balaguer, C. & Arcil, R.

2.2.2.4. Análisis de alternativas de extrusor. Para el análisis de las alternativas de extrusor, se consideraron inicialmente cinco opciones distintas, cada una con características particulares que podrían ser relevantes para el funcionamiento del prototipo de impresora 3D. Estas alternativas fueron seleccionadas a partir de una revisión preliminar de tecnologías existentes y disponibles en el mercado y una fase de creación, estas alternativas pasaron un primer filtro de evaluación basado en las especificaciones de desempeño previamente definidas, como la especificación de almacenamiento de material, la facilidad de operación, y la capacidad para manejar materiales como arcilla y barro. Este filtro inicial permitió descartar algunas alternativas que no cumplían con los requisitos esenciales. El siguiente paso consistirá en evaluar cada una de estas alternativas en mayor detalle, considerando su viabilidad técnica y económica, así como su compatibilidad con los demás componentes del sistema.

2.2.2.4.1. Alternativa 1: Extrusor con acople directo y tornillo sin fin. Esta alternativa de extrusor presenta un diseño integrado que combina el sistema de almacenamiento y la deposición del material en una sola pieza, adaptándose directamente al eje Z del prototipo. En este sistema, el material se deposita en una tolva, la cual se conecta con un tornillo sin fin. El tornillo, al estar acoplado de manera directa a un actuador, se pone en movimiento a medida que el actuador gira, lo que permite que el tornillo sin fin empuje la mezcla hacia la boquilla. Esta boquilla, a su vez, deposita el material capa por capa sobre la superficie, permitiendo la creación del objeto. Este diseño simplificado reduce la cantidad de componentes y, por lo tanto, puede ofrecer mayor eficiencia en el proceso de extrusión, siempre y cuando se cumplan las especificaciones de desempeño relacionadas con el flujo constante del material y la facilidad de limpieza del sistema.

Figura 17

Ejemplo de alternativa 1 de extrusor

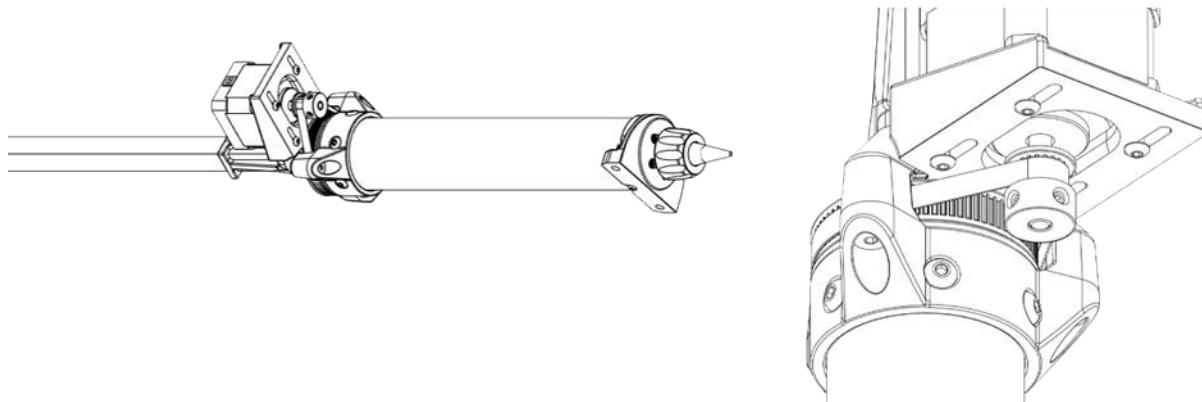


Nota. La figura muestra el diseño CAD de un extrusor de una pieza con un motor nema 17, con un acople directo a un tornillo sin fin y un compartimiento tipo tolva para almacenamiento y deposición de material. Fuente *Z Morph extruder for Ender3*. (2021), Devereu, J. GrabCad. <https://grabcad.com/library/zmorph-extruder-for-ender3-1>.

2.2.2.4.2. Alternativa 2: Extrusor con correas dentadas. Esta alternativa de extrusor integra las funciones de almacenamiento, transporte y deposición en una estructura compacta. El sistema de transmisión comienza en el eje de salida del motor, que se conecta a una polea dentada conductora. Esta polea está unida mediante una correa dentada a otra polea dentada de mayor tamaño, lo que permite una reducción de velocidad al mismo tiempo que aumenta el torque disponible. A partir de aquí, la polea de salida acciona un tornillo de potencia, que a su vez ejerce presión sobre la mezcla, impulsándola a través de un sistema de pistón hacia la boquilla de salida para su deposición capa por capa.

Figura 18

Ejemplo de alternativa 2 de extrusor

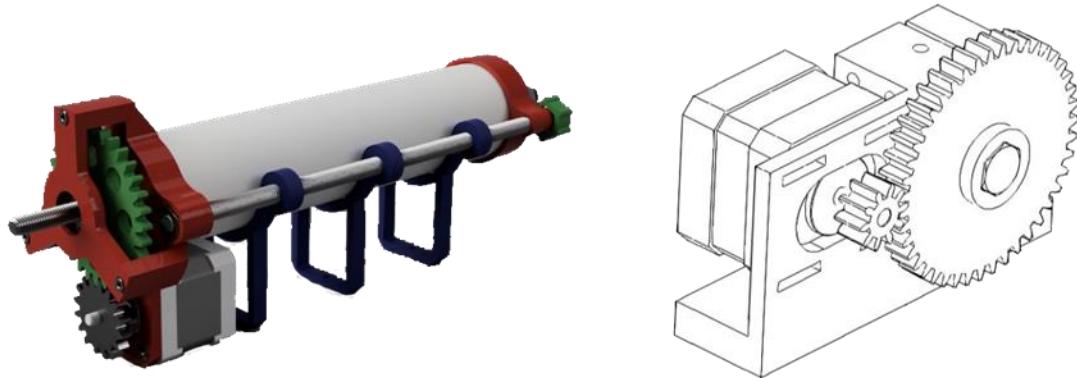


Nota. La figura muestra el diseño CAD de un extrusor de una pieza con un motor nema 17, con poleas y correas dentadas y un compartimiento para almacenamiento de material. Fuente *Custom 3d printer for printing clay/paste.* (2021), Whood, C. GrabCad. <https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1>.

2.2.2.4.3. Alternativa 3: Extrusor con engranajes rectos de una pieza. Este modelo de extrusor es similar a la segunda alternativa, con la diferencia de que el eje de salida del motor está acoplado a un sistema de piñón y corona. La corona está conectada a un tornillo de potencia, el cual empuja la mezcla en el tanque de almacenamiento mediante un mecanismo de pistón. A medida que el tornillo avanza, el pistón presiona la mezcla hacia la boquilla, desde donde se deposita de forma continua, capa por capa.

Figura 19

Ejemplo de alternativa 3 de extrusor



Nota. La figura muestra el diseño CAD de un extrusor de una pieza con un motor nema 17 conectado a un sistema de engranajes rectos de piñón- corona y su tanque de almacenamiento de mezcla.

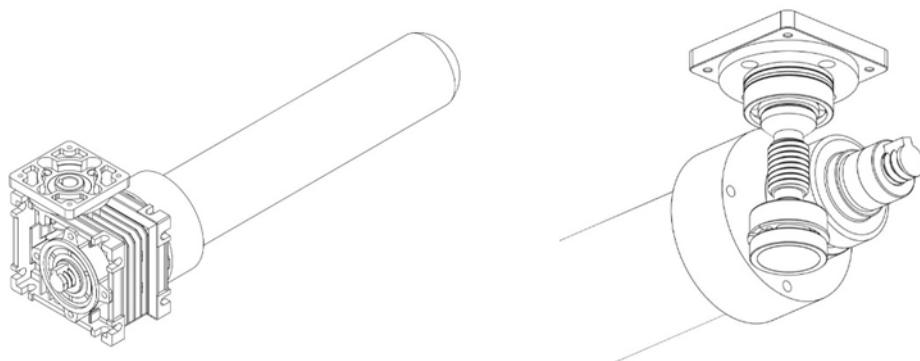
Fuente *BLVPstruder* (2022), *TooManySecrets*. Printables.

<https://www.thingiverse.com/thing:5255344>.

2.2.2.4.4. Alternativa 4: Extrusor con transmisión de tornillo sin fin y corona. El extrusor en esta alternativa está compuesto por dos piezas principales. La primera es un tanque de almacenamiento cilíndrico que alberga el motor. El eje de salida de este motor se conecta a una caja reductora que utiliza un sistema de transmisión de potencia basado en un tornillo sin fin y una corona. La corona se acopla a un tornillo de potencia, el cual impulsa la mezcla en un sistema de pistón ubicado en el cilindro de almacenamiento. Posteriormente, la mezcla es transportada a través de una manguera conectada al cilindro y llega a la boquilla situada en el eje Z, desde donde se deposita capa por capa durante el proceso de impresión.

Figura 20

Ejemplo de alternativa 4 de extrusor



Nota. La figura muestra el diseño CAD de la primera pieza del extrusor en donde se observa la caja reductora y el mecanismo de tornillo sin fin y corona en la transmisión de potencia, conectado a un tanque de almacenamiento de material. Tomado de *SolidWorks*. Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

2.2.2.4.5. Alternativa 5: Extrusor con actuador neumático de dos piezas. Este modelo de extrusor utiliza un actuador neumático que está acoplado a un tanque sellado herméticamente. Al aplicarse aire comprimido, la presión resultante empuja un pistón que, a su vez, fuerza el desplazamiento de la mezcla a través de una manguera. Esta manguera está conectada a una boquilla montada en el eje Z del sistema, desde donde el material es depositado de forma precisa capa por capa.

2.2.2.5. Análisis de material. La extrusión del material en la impresión 3D, especialmente con materiales como la arcilla, representa un desafío significativo debido a las propiedades reológicas de estos materiales. La fluidez del material durante el proceso de extrusión está directamente influenciada por la viscosidad, la plasticidad y la consistencia, lo que afecta tanto la calidad como la precisión de las piezas impresas. Estos factores son cruciales para garantizar que el material fluya de manera constante a través de la boquilla, permitiendo una correcta deposición capa por capa.

En el contexto de este proyecto, se realizó una investigación exhaustiva sobre las propiedades de la arcilla y otros materiales alternativos, con el objetivo de optimizar sus características para la impresión 3D. A través de esta investigación, se compararon diferentes mezclas y compuestos, explorando aditivos y modificaciones que pudieran mejorar la fluidez del material, minimizar el riesgo de obstrucciones en el extrusor y mejorar la adherencia entre capas. Esta fase del estudio se centra en encontrar la combinación adecuada de ingredientes que no solo garantice la facilidad de extrusión, sino también la durabilidad y la sostenibilidad del material utilizado para la construcción de las viviendas.

Figura 21

Registro fotográfico de pruebas de material



Nota. La imagen muestra el proceso de pruebas con distintas proporciones de arcilla y barro, incluyendo las fibras vegetales. Tomado de *elaboración propia*.

Mezcla 1: 70% arcilla, 10% fibras vegetales, 5% aceite de oliva, 5% goma arábica, 10% agua.

Mezcla 2: 70% arcilla, 20% fibras vegetales, 10% agua.

2.2.3. Resultado de selección

A continuación de la fase de análisis, se avanza a la fase de selección, en la cual se evaluarán y compararán todas las alternativas planteadas previamente. Esta evaluación se llevará a cabo en tres áreas principales: la morfología del robot, las opciones de extrusor y las posibles alternativas de material. Durante este proceso, se emplearán criterios específicos que permitirán filtrar y priorizar las opciones más viables, de acuerdo con las especificaciones de desempeño definidas en fases anteriores del proyecto.

En esta sección, se detallarán los métodos utilizados para la selección de cada componente, explicando cómo se han utilizado herramientas y criterios de decisión para determinar las alternativas más apropiadas. Además, se presentará un análisis de las ventajas y desventajas de las opciones consideradas, así como la justificación para la elección final en cada categoría. Este proceso es crucial para garantizar que el prototipo diseñado cumpla con los objetivos del proyecto, optimizando tanto su rendimiento como su viabilidad técnica y económica.

2.2.3.1. Selección de morfología del robot. Para la selección de la morfología del robot, se consideraron las cuatro opciones de configuraciones descritas en la sección de análisis. En esta etapa, se basaron las decisiones en investigaciones previas del estado del arte y en literatura especializada en robótica, que proporcionaron información valiosa sobre las características y ventajas de cada tipo de configuración. Como primer paso del proceso de selección, se elaboraron tablas de combinación que permitieron facilitar la comparación y evaluación de las opciones, lo que hizo más claro identificar cuál era la morfología más adecuada para el proyecto en cuestión.

Es importante destacar que las configuraciones consideradas en esta fase son aún bastante generales, ya que dentro de cada tipo de morfología existen múltiples variantes de robots, cada uno con diferentes configuraciones de actuadores, materiales de estructura y otros componentes clave. Debido a esto, la selección se centró inicialmente en ciertos criterios que se consideran fundamentales para el rendimiento del prototipo. Los criterios principales elegidos para la evaluación fueron la repetibilidad, la facilidad de control y de mantenimiento. Estos factores son esenciales para garantizar que el prototipo pueda cumplir con los requisitos técnicos y operativos del proyecto, y asegurarse de que sea eficiente, confiable y fácil de mantener durante su uso.

Tabla 3*Tabla de combinación de morfología cilíndrica*

Morfología de robot	Repetibilidad	Configuración cinemática	Facilidad de mantenimiento
Cilíndrica			
Antropomórfica	Alta	Compleja	Fácil
Polar	Media	Media	Diffícil
Cartesiana		Sencilla	

```

graph LR
    C[Cilíndrica] --- CC[Compleja]
    A[Antropomórfica] --- R[Alta]
    P[Polar] --- M[Media]
    C4[Cartesiana] --- S[Sencilla]
    M --- F[Fácil]
    M --- D[Diffícil]
  
```

Nota. La tabla presenta la combinación de la morfología cilíndrica respecto a los criterios visualizados en la primera fila. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

La morfología cilíndrica ofrece ventajas notables en términos de alcance y volumen de trabajo debido a su estructura, aunque estas características no son las más prioritarias en este proyecto. Además, la articulación rotacional, inherente a este diseño, presenta una complejidad media en el control de su cinemática. Esto puede llevar a acumulación de errores en la precisión y afectaciones en la repetitividad del movimiento. En cuanto al mantenimiento, su articulación rotacional presenta múltiples puntos de desgaste, así como áreas de acceso limitado, complicando tareas de lubricación y ajustes de rodamientos y engranajes.

Tabla 4*Tabla de combinación de morfología antropomórfica*

Morfología de robot	Repetibilidad	Configuración cinemática	Facilidad de mantenimiento
Cilíndrica			
Antropomórfica	Alta	Compleja	Fácil
Polar	Media	Media	
Cartesiana		Sencilla	Diffícil

Nota. La tabla presenta la combinación de la morfología cilíndrica respecto a los criterios visualizados en la primera fila. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

La morfología antropomórfica, caracterizada por tres ejes rotacionales, es la configuración más compleja en términos de diseño y control. Esta estructura ofrece un alcance superior comparado con las demás morfologías, pero dado que el alcance no es un aspecto esencial para el proyecto, esto no representa una ventaja significativa en este contexto. Además, esta morfología es propensa a presentar problemas de precisión y repetibilidad, ya que los errores en las articulaciones se acumulan a lo largo de la cadena cinemática. Esta acumulación puede provocar desviaciones en la trayectoria de impresión, afectando la calidad de las piezas.

En cuanto a su mantenimiento, la estructura antropomórfica es menos accesible, con múltiples puntos de desgaste en sus ejes rotacionales y áreas difíciles de alcanzar, como rodamientos y engranajes. Esta dificultad aumenta la frecuencia y el tiempo requerido para tareas de mantenimiento preventivo y correctivo. Adicionalmente, su diseño implica una mayor carga en las articulaciones, incrementando el desgaste con el tiempo. Finalmente, en comparación con otras morfologías, los movimientos de esta configuración tienden a ser más lentos y menos directos, lo

cual podría afectar la velocidad y eficiencia de la impresión en estructuras de mayor tamaño, como es el objetivo de este proyecto.

Tabla 5

Tabla de combinación de morfología polar

Morfología de robot	Repetibilidad	Configuración cinemática	Facilidad de mantenimiento
Cilíndrica			
Antropomórfica	Alta	Compleja	Fácil
Polar	Media	Media Sencilla	Diffícil
Cartesiana			

Nota. La tabla presenta la combinación de la morfología cilíndrica respecto a los criterios visualizados en la primera fila. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Como se muestra en la tabla 5, la configuración polar comparte similitudes con la antropomórfica al incluir dos ejes rotacionales junto con un eje prismático, lo que le permite combinar cierta flexibilidad de movimiento con un control más sencillo. Esta configuración suele ofrecer una velocidad de operación superior a la antropomórfica y un equilibrio favorable entre alcance y complejidad en el control cinemático. Sin embargo, el mantenimiento resulta más exigente en comparación con una configuración cilíndrica, debido a los elementos rotacionales. La capacidad de carga de la morfología polar puede ser algo limitada, y la precisión en la repetibilidad puede verse afectada debido a la acumulación de errores a lo largo de la cadena cinemática. Estos factores deben considerarse especialmente en aplicaciones que requieren alta estabilidad en la trayectoria de impresión y durabilidad de las piezas móviles.

Tabla 6*Tabla de combinación de morfología cartesiana*

Morfología de robot	Repetibilidad	Configuración cinemática	Facilidad de mantenimiento
Cilíndrica			
Antropomórfica	Alta	Compleja	Fácil
Polar	Media	Media	
Cartesiana		Sencilla	Diffícil

Nota. La tabla presenta la combinación de la morfología cartesiana respecto a los criterios visualizados en la primera fila. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

La morfología cartesiana presenta diversas ventajas en comparación con otras configuraciones. Su principal ventaja radica en la simplicidad de su cadena cinemática, ya que, como señala Ollero Baturone (2001), “los valores que deben tomar las variables articulares corresponden directamente a las coordenadas que toma el extremo del brazo. Por consiguiente, en esta configuración, se simplifica la tarea del controlador del robot”. Gracias a esta simplicidad, la precisión y la repetibilidad son muy altas, al minimizar los errores acumulativos en la configuración de las trayectorias. Además, las articulaciones prismáticas, características de esta morfología, son más fáciles de mantener en comparación con otros tipos de articulaciones. La lubricación de guías, el ajuste de tensión en las correas y la limpieza de los ejes o rieles son tareas relativamente sencillas. Sin embargo, su desventaja es el alcance, que está limitado por la estructura del robot. A pesar de esto, dicha estructura es significativamente más rígida que la de otras configuraciones, lo que la hace ideal para soportar cargas altas, como el extrusor y el material. Aunque los robots cartesianos no son la mejor opción para distancias largas o geometrías circulares, su balance entre precisión y velocidad es sobresaliente.

A partir de las consideraciones previas y utilizando las tablas de combinación como herramienta de apoyo, se tomó la decisión de seleccionar una morfología cartesiana para el prototipo. Esta elección se basó en el análisis detallado de las ventajas y desventajas de cada configuración, en la que la simplicidad cinemática y la alta precisión resultaron ser factores clave. Como siguiente paso, se desarrollaron diversas alternativas de modelos cartesianos, las cuales fueron evaluadas exhaustivamente para identificar la opción que mejor se ajustara a los requerimientos y objetivos del proyecto.

2.2.3.2. Alternativas de diseño cartesiano. Una vez seleccionada la morfología cartesiana para el prototipo, se procedió a explorar distintas alternativas de diseño, considerando los diversos sistemas de transmisión mecánica lineales disponibles, tales como cremallera y piñón, husillo y tuerca, correas y poleas, guías lineales, entre otros. Cada uno de estos sistemas se analizó en términos de eficiencia, costo, facilidad de implementación y mantenimiento. Por ejemplo, el sistema de cremallera y piñón ofrece alta velocidad y simplicidad, mientras que los husillos y tuercas brindan mayor precisión, pero a un costo ligeramente superior. Esta evaluación ayudó a identificar las opciones más apropiadas para los objetivos del prototipo.

Además, se decidió utilizar actuadores eléctricos debido a su alta fiabilidad y control preciso, como se aprecia en la tabla 7, características esenciales en robots cartesianos. En particular, los motores paso a paso de los modelos NEMA 17 y NEMA 23 fueron seleccionados, ya que son altamente comerciales y ofrecen un balance excelente entre tamaño, torque, precisión, facilidad de integración y costos relativamente bajos. Estos actuadores no solo son compactos, sino que también proporcionan la fuerza y exactitud necesarias para el control de movimientos en el prototipo.

Tabla 7*Tabla de comparación de actuadores para robots*

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	· Aire a presión (5-10 bar)	· Aceite mineral (50-100 bar)	· Corriente eléctrica
Opciones	· Cilindros · Motor de paletas · Motor de pistón	· Cilindros · Motor de paletas · Motor de pistones axiales	· Corriente continua · Corriente alterna · Motor paso a paso
Ventajas	· Baratos · Rápidos · Sencillos · Robustos	· Rápidos · Alta relación potencia-peso · Autolubricantes · Alta capacidad de carga · Estabilidad frente a cargas estáticas	· Precisos · Fiables · Fácil control · Sencilla instalación · Silenciosos
Desventajas	· Dificultad de control continuo · Instalación especial (compresor, filtros) · Ruidoso	· Difícil mantenimiento · Instalación especial (filtros, eliminación aire) · Frecuentes fugas · Caros	· Potencia limitada

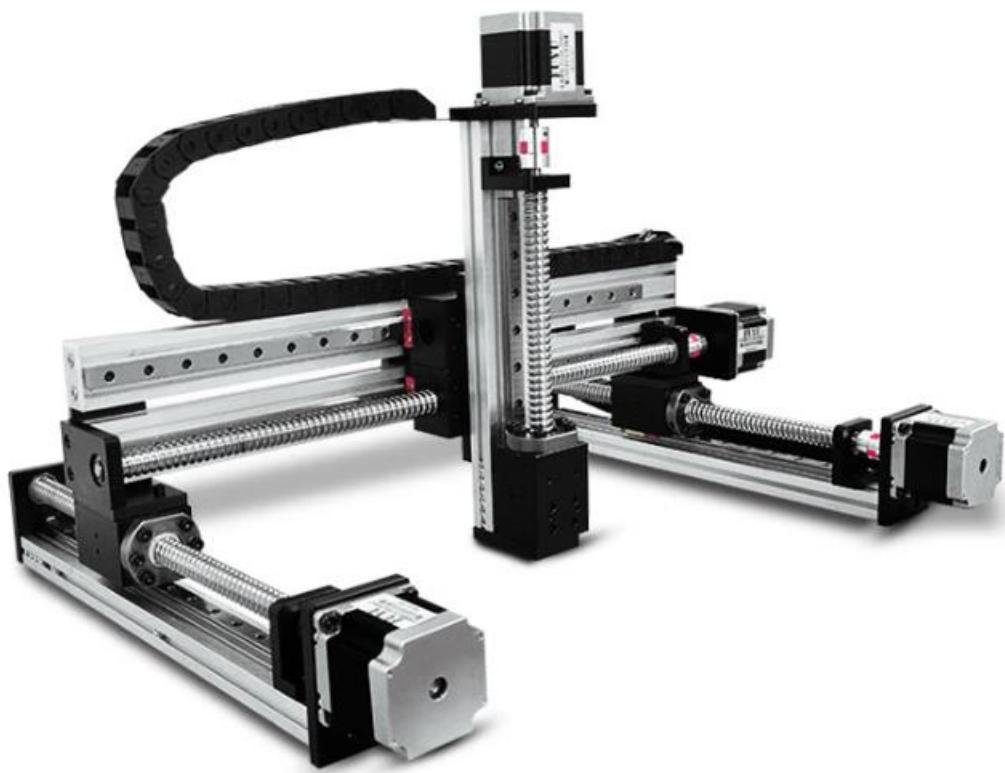
Nota. La tabla presenta las características de los actuadores neumático, hidráulico y eléctrico, en donde se observan las comparaciones de ventajas y desventajas de cada uno. Tomado de *Fundamentos de robótica. (1997), Barrientos, A. Peñin, L, Balaguer, C. & Arcil, R.*

Asimismo, en el diseño de las alternativas se consideraron diferentes distribuciones de los actuadores, buscando siempre optimizar la eficiencia del sistema. Esto incluye no solo la disposición mecánica, sino también la facilidad de mantenimiento y la accesibilidad de los componentes clave. Cada diseño se ajustó a los requerimientos específicos del prototipo, como la capacidad de carga, la precisión en los movimientos y la integración con otros sistemas, con el fin de garantizar el mejor desempeño posible.

2.2.3.2.1. Alternativa de robot cartesiano 1: Husillo y tuerca con guías lineales. Esta alternativa de diseño del robot emplea dos motores NEMA 17 ubicados en el eje Y, conectados mediante acoplos de 5 mm a 8 mm a tornillos de bolas recirculantes y sus respectivas tuercas, lo que permite un movimiento lineal preciso. Las guías lineales complementan el sistema, asegurando una traslación suave y eficiente. En el eje X, se utiliza un motor NEMA 17 con un sistema de transmisión similar al del eje Y, pero con la particularidad de contar con dos guías lineales, lo que ayuda a reducir las inclinaciones que podrían presentarse en el eje Z. Este último eje está impulsado por otro motor NEMA 17, que está acoplado a un husillo, una tuerca y una guía lineal, formando un sistema robusto para movimientos verticales precisos y controlados.

Figura 22

Alternativa 1 de robot cartesiano

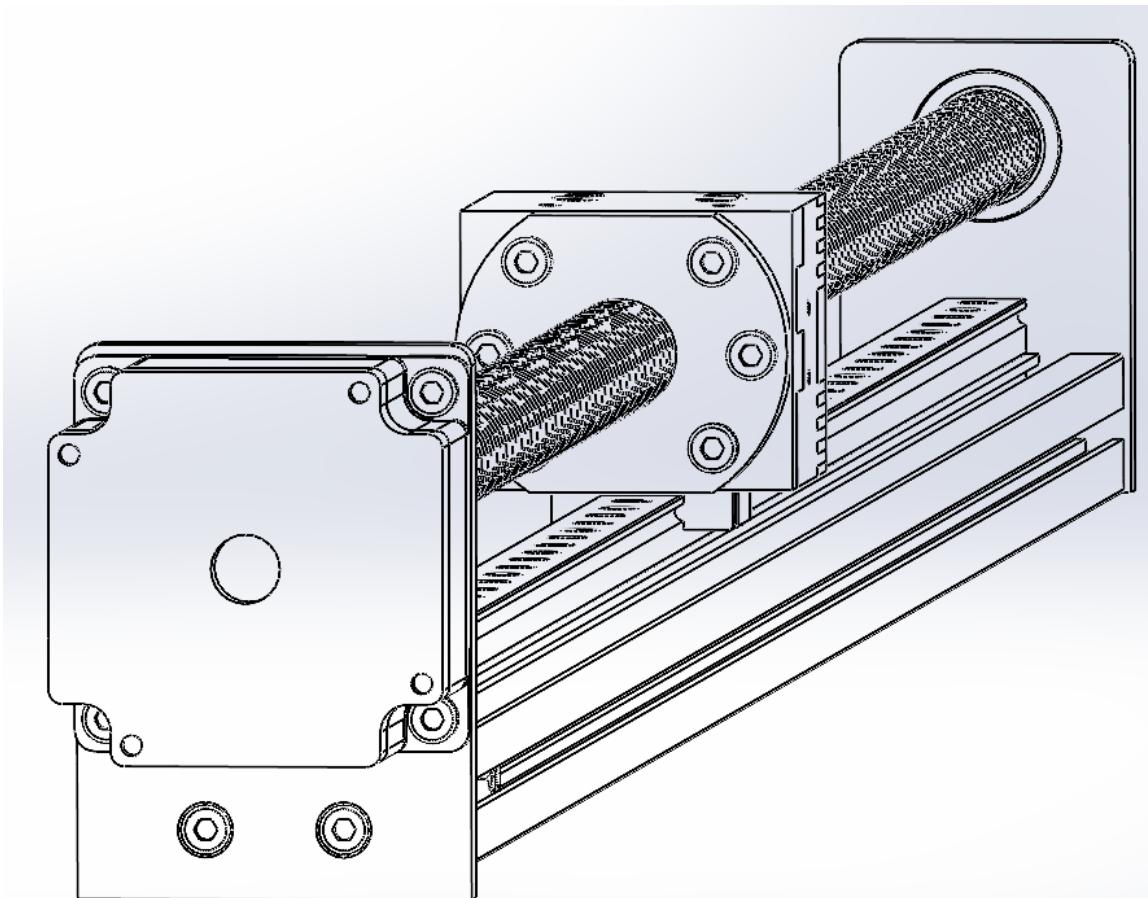


Nota. La figura presenta un robot cartesiano de 3 grados de libertad comercial. Fuente *Robot industrial FTS40XYZ-L. Made in China. (s.f.).* <https://es.made-in-china.com/>

china.com/co_fuyumotion/product_Multi-Axis-Table-Xyz-Stage-Indutrial-Cartesian-Coordinator-Robot_osyueoseg.html.

Figura 23

Detalle de la transmisión mecánica lineal de la primera alternativa de robot cartesiano



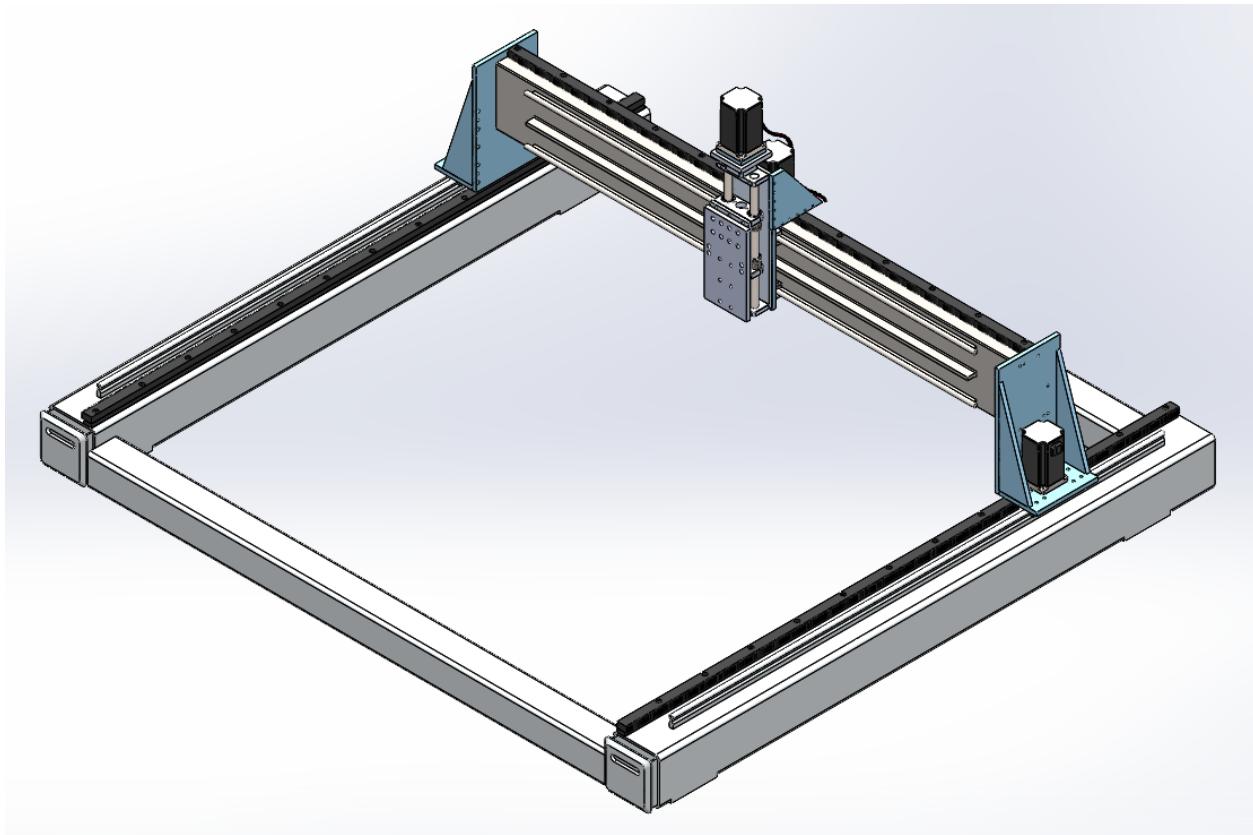
Nota. La figura muestra a detalle el sistema de transmisión mecánica lineal de un husillo, con su respectiva tuerca sujetada a un rodamiento lineal. Debajo de este se observa la guía lineal.
Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

2.2.3.2.2. Alternativa de robot cartesiano 2: Piñón – cremallera con guías de rieles lineales.

Esta alternativa de diseño, tal y como se aprecia en la figura 24, utiliza dos motores NEMA 23 en el eje Y, cada uno acoplado a un piñón. Al girar, estos piñones avanzan linealmente a lo largo de las cremalleras fijadas a los perfiles estructurales. El movimiento lineal se estabiliza mediante guías de rieles lineales, mientras que el carro del eje X se desplaza sobre estas guías utilizando rodamientos lineales. El eje X también está impulsado por un motor NEMA 23 con un sistema de piñón y cremallera similar al del eje Y, pero con la adición de dos guías de rieles lineales para evitar inclinaciones en el eje Z. Este último eje se mueve a lo largo del eje X mediante rodamientos lineales. Finalmente, el eje Z utiliza un motor NEMA 23 acoplado a un mecanismo de movimiento lineal basado en husillo y tuerca, complementado con dos ejes acerados que aseguran un desplazamiento preciso y estable.

Figura 24

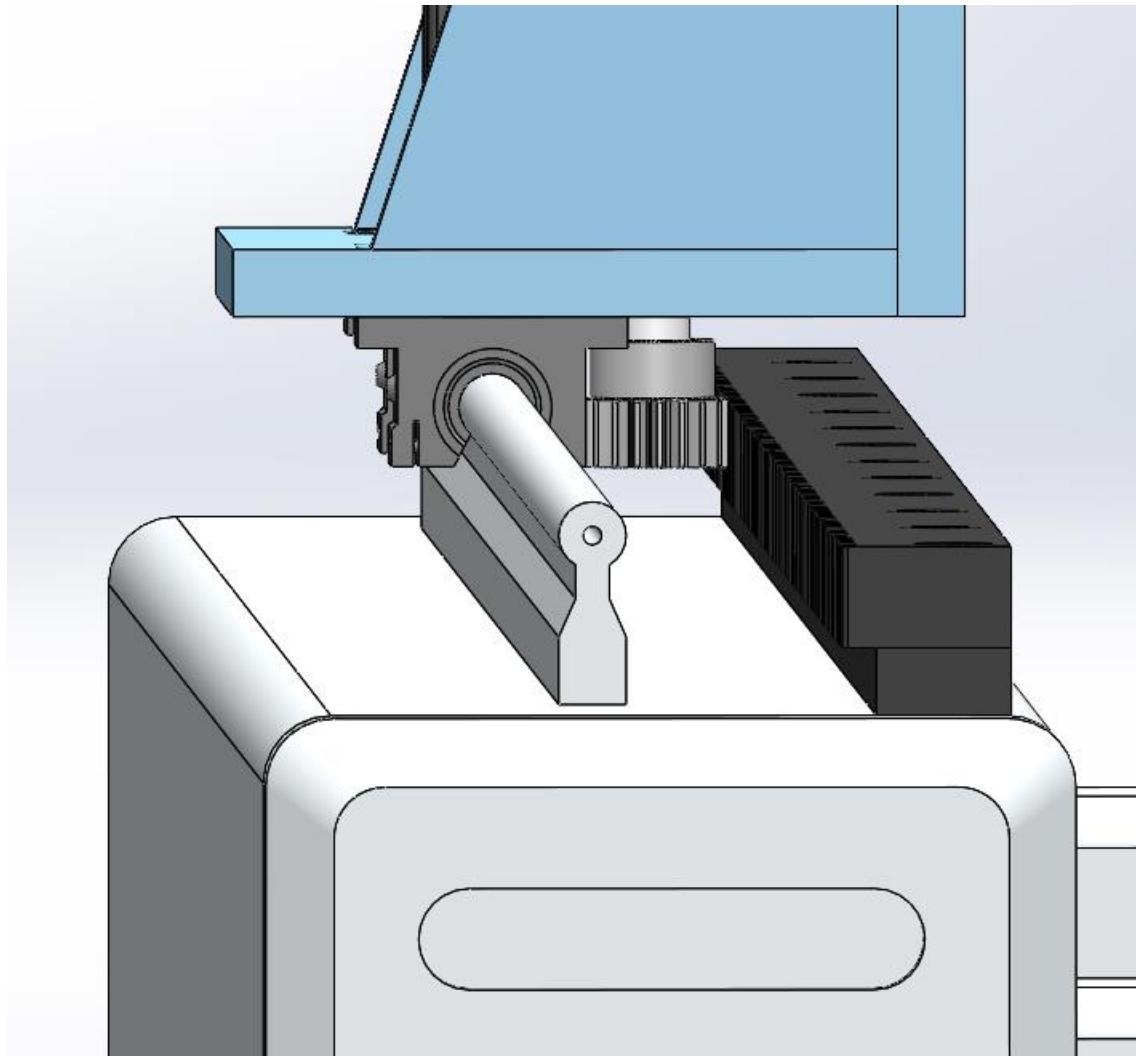
Alternativa 2 de robot cartesiano



Nota. La figura muestra el diseño CAD de un robot cartesiano en perspectiva isométrica. Fuente de *Custom 3d printer fot printing clay/paste.* (2021), Whood, C. GrabCad. <https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1>.

Figura 25

Detalle de la transmisión mecánica lineal de la segunda alternativa de robot cartesiano

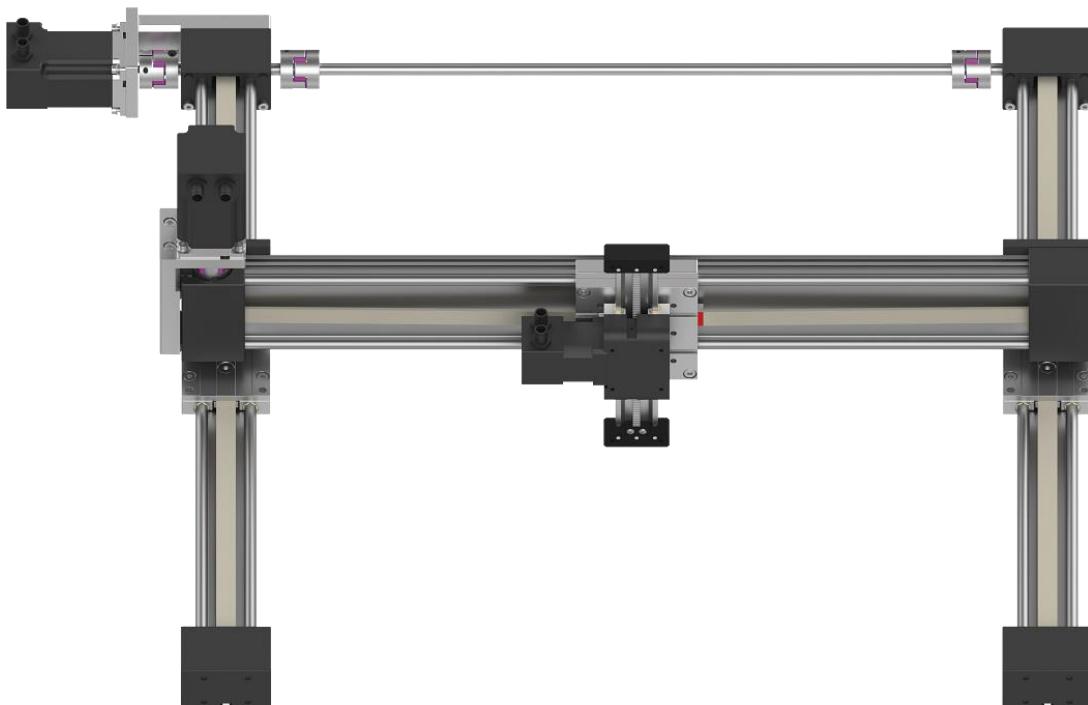


Nota. La figura muestra sistema de piñón y cremallera del eje Y a detalle. Fuente *Custom 3d printer fot printing clay/paste.* (2021), Whood, C. GrabCad. <https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1>.

2.2.3.2.3. Alternativa de robot cartesiano 3: Poleas y correas dentadas, guías lineales y un motor en eje Y. Esta alternativa, tal y como se muestra en la figura 26, utiliza un único motor NEMA 23 en el eje Y, cuyo eje de salida se conecta a una polea dentada mediante un acople. Esta polea se conecta a otra polea dentada en el extremo opuesto del eje Y, de manera que ambas giran simultáneamente. Estas poleas dentadas se enlazan a través de una correa dentada que acciona el carro del eje X. El eje X utiliza un sistema similar, con un motor NEMA 23 que se conecta a una polea dentada mediante un acople. La correa dentada del eje X mueve un subensamblaje que conecta con el eje Z. Este último cuenta con un motor NEMA 23 que impulsa un mecanismo de piñón y cremallera, apoyado por dos guías lineales a ambos lados para asegurar la estabilidad del movimiento.

Figura 26

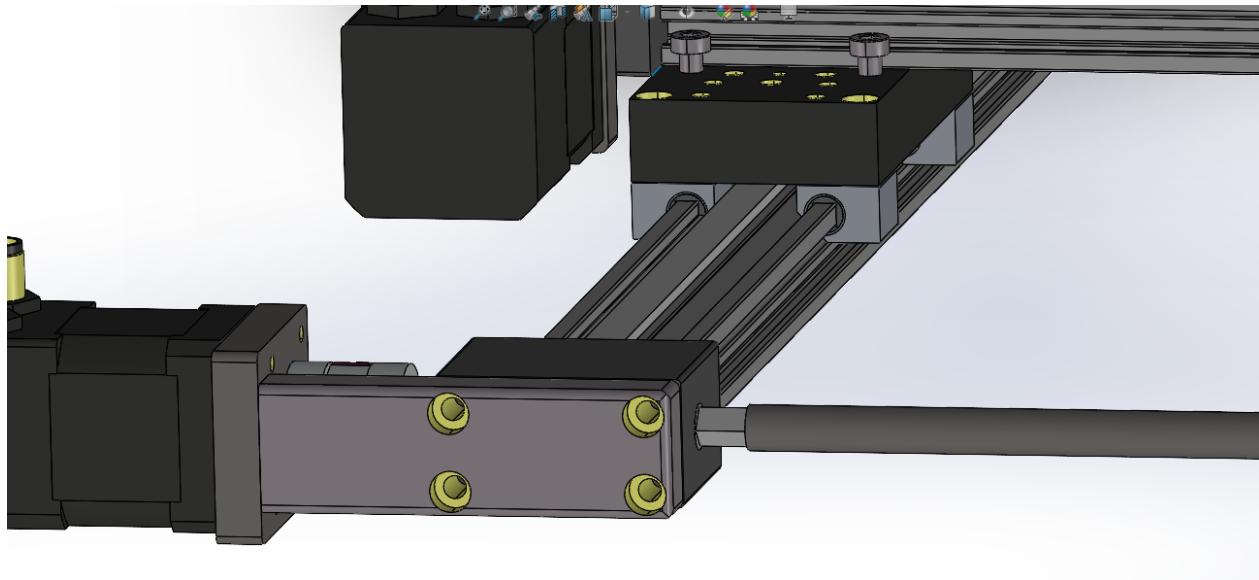
Alternativa 3 de robot cartesiano



Nota. La figura muestra el diseño CAD de un robot cartesiano de 3 grados de libertad. Fuente *Pórtico plano en H. (S.f)*, *Igus motion plastic*. Igus. <https://www.igus.es/info/modulos-lineales-economicos>.

Figura 27

Detalle de la transmisión mecánica lineal de la tercera alternativa de robot cartesiano



Nota. La figura muestra el sistema de acople del eje Y, así como el sistema de transmisión mecánica lineal con las respectivas guías lineales. Fuente *Pórtico plano en H. (S.f)*, *Igus motion plastic*. Igus. <https://www.igus.es/info/modulos-lineales-economicos>

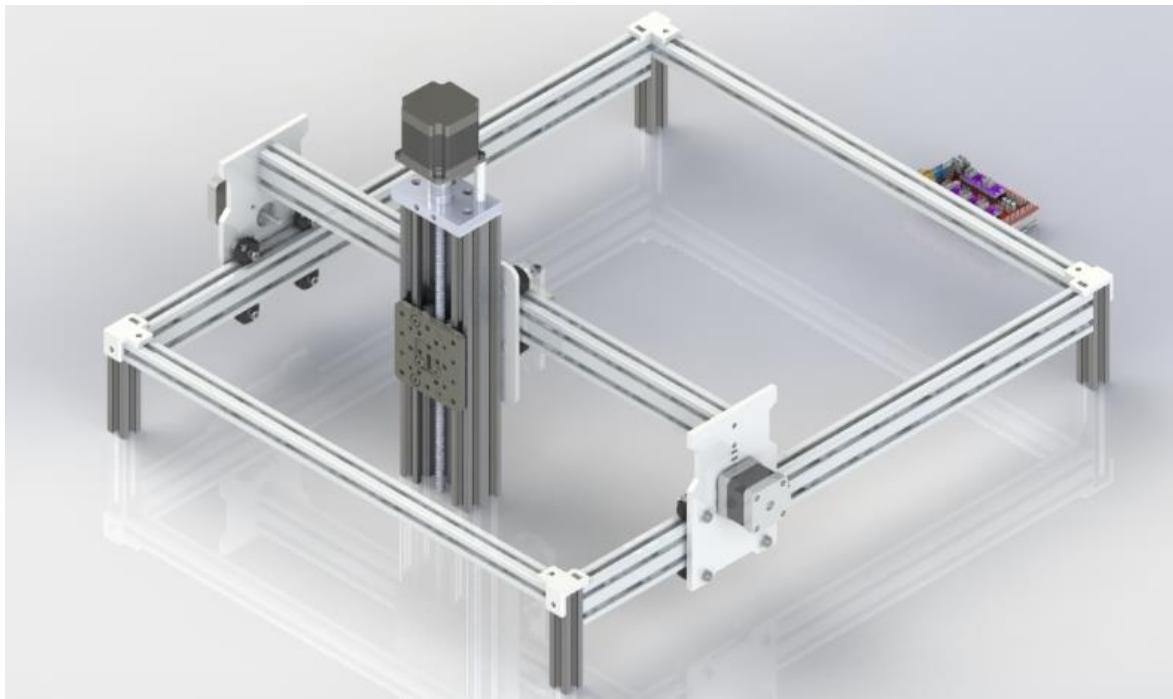
2.2.3.2.4. Alternativa de robot cartesiano 4: Poleas y correas dentadas con rodamientos en V.

La estructura de esta alternativa está principalmente compuesta por perfiles estructurales 2020. El eje Y cuenta con dos motores NEMA 17, cada uno acoplado a poleas dentadas. Estas poleas se mueven mediante correas dentadas que se deslizan a lo largo de rodamientos 625ZZ ubicados bajo los perfiles 2040, y los rodamientos lineales están conectados al carro del eje X. El carro del eje X también está acoplado a una polea dentada que se desplaza a través de una correa dentada dentro

de un perfil 2040. En el eje X, se ensambla el eje Z, compuesto por un actuador lineal con un perfil C 4080, en cuyo interior se encuentra un husillo. La tuerca de este husillo se fija a la base del extrusor y se conecta a cuatro rodamientos 625ZZ, que facilitan su desplazamiento.

Figura 28

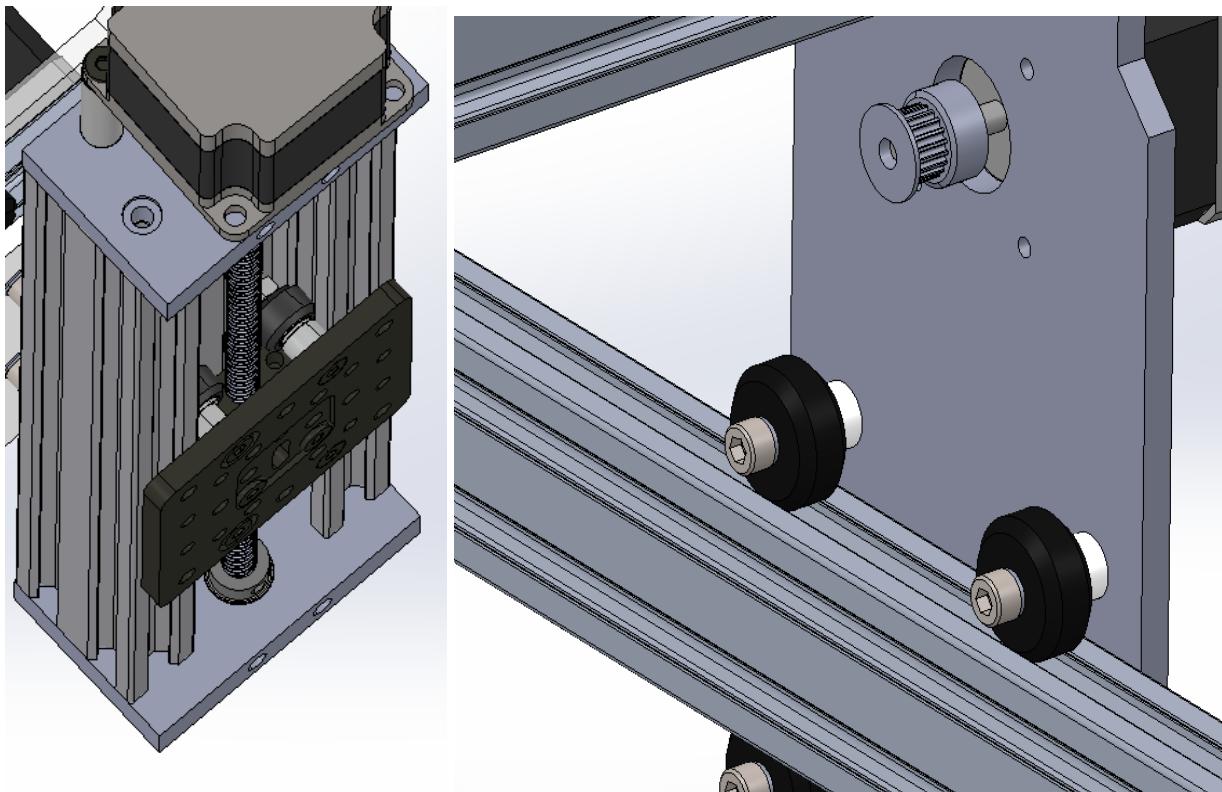
Alternativa 4 de robot cartesiano



Nota. La figura muestra el diseño CAD de un robot cartesiano en perspectiva isométrica. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Figura 29

Detalle de la transmisión mecánica lineal de la cuarta alternativa de robot cartesiano



Nota. La figura muestra en la izquierda el detalle del husillo y la tuerca conectadas a la base del eje z, con sus 4 rodamientos 625zz, a la derecha se observa el detalle de la transmisión mecánica lineal del eje Y, con su polea dentada y los rodamientos 625zz. Tomado de Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

2.2.3.3. Selección de robot cartesiano. Tras definir las cuatro alternativas de robots cartesianos, se establecieron criterios de evaluación que sirven como filtro de selección, basados en las especificaciones de desempeño. Primero, se consideró el presupuesto limitado, siendo el costo el criterio de mayor prioridad, por lo que se realizó una cotización detallada de cada opción.

El segundo criterio, área de impresión, evaluó la movilidad en cada eje, lo cual influye en el tamaño de las piezas imprimibles. Para el tercer criterio, velocidad, se analizaron las fichas técnicas de los actuadores y el sistema de transmisión de cada alternativa, detalladas en el anexo A.

Además, se consideró la complejidad de ensamblaje, evaluada por el número de operaciones y relaciones de posición de los componentes, según lo calculado en SolidWorks. A cada criterio se le asignó un peso específico, siendo el costo el más importante, seguido de área de impresión, velocidad y ensamblaje. La evaluación se hizo en una escala del 1 al 10, donde 1 representa el peor desempeño y 10 el mejor en cada criterio. Este enfoque permite seleccionar la alternativa óptima que mejor se ajuste a las necesidades del proyecto, priorizando tanto el desempeño como los costos y facilidad de montaje.

Los criterios de evaluación se ubicaron en la matriz de selección de la tabla 8, junto a su factor de ponderación, las distintas alternativas de robot y su puntuación.

Tabla 8

Matriz de selección de robot cartesiano

	COSTO (COP\$)	VELOCIDAD (mm/s)	ÁREA DE IMPRESIÓN (cm ²)	NÚMERO DE OPERACIONES DE ENSAMBLE	RANGO
FACTOR DE PONDERACIÓN	0.4	0.2	0.15	0.25	1
ALTERNATIVA DE ROBOT CARTESIANO 1	1	10	10	1	4.15
ALTERNATIVA DE ROBOT CARTESIANO 2	5	10	8	5	6.45
ALTERNATIVA DE ROBOT CARTESIANO 3	7	1	10	3	5.25
ALTERNATIVA DE ROBOT CARTESIANO 4	10	5	1	10	7.65

Nota. La tabla presenta los resultados de la matriz de selección teniendo en cuenta 4 criterios con su respectiva ponderación. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Como resultado de la evaluación, se determinó que la alternativa de robot cartesiano 4 es la opción óptima para el sistema CNC, gracias a su desempeño en los criterios establecidos. A continuación, se avanzó en la selección del extrusor y el material, lo que permitió iniciar el diseño CAD preliminar. Este modelo preliminar facilitará la planificación de las siguientes fases, asegurando que cada componente cumpla con las especificaciones necesarias para el prototipo final.

2.2.3.4. Selección del extrusor. Se procederá a elaborar una matriz comparativa preliminar en la que se evaluarán las cinco alternativas de extrusores identificadas en la fase de análisis. La comparación se basará en siete criterios de evaluación, siguiendo el estándar de utilizar un número impar de criterios, como se recomienda en metodologías de diseño. Esta matriz tiene como objetivo seleccionar las tres alternativas más adecuadas, considerando su desempeño en cada uno de los criterios propuestos para un análisis más detallado en las siguientes fases del proyecto.

Tabla 9

Matriz comparativa preliminar de alternativas de extrusor

Criterio de selección	Acople y tornillo sin fin	Correas dentadas	Engranajes rectos	Tornillo sin fin y corona	Compresor y pistón
Costo	+	0	0	-	-
Peso	+	-	-	+	+
Disponibilidad	-	+	0	+	0
Mantenimiento	0	+	0	+	-
Almacenamiento	-	+	+	+	+
Durabilidad	0	0	-	+	-
Fácil llenado	+	+	-	+	0
Suma +'s	3	4	1	5	2
Suma 0's	2	2	3	0	2
Suma -'s	2	1	3	1	3
Puntuación neta	1	3	-2	4	-1
Clasificación	3	2	4	1	5

Nota. La primera columna de la tabla enumera los criterios de selección, las otras 5 columnas contienen las 5 alternativas de extrusor.

Cada fila tendrá un más (+) en caso de que la alternativa de diseño tenga mejor desempeño que las demás alternativas en el mismo criterio, un 0 en caso de que sea igual y un menos (-) en caso de que sea peor que las demás. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

De la anterior matriz se tuvo que las 3 mejores opciones son: el extrusor con transmisión de potencia de tornillo sin fin y corona, y tornillo de potencia con mecanismo de cilindro-pistón para transporte de material, la segunda opción sería el extrusor con transmisión de potencia con correas dentadas y tornillo de potencia con mecanismo de cilindro-pistón para transporte de material, la tercera opción sería el extrusor con acople directo para transmisión de potencia al tornillo sin fin, y el tornillo sin fin para transporte de material.

Acto seguido se evaluó la prioridad de los criterios de selección, para ello se puntuó cada criterio de selección de la forma en la que se observa en la tabla 10.

Tabla 10

Tabla de puntajes de rendimiento relativo

RENDIMIENTO RELATIVO	PUNTAJE
IGUAL DE IMPORTANTE	1
LIGERAMENTE MÁS IMPORTANTE	2
MÁS IMPORTANTE	3
MUCHO MÁS IMPORTANTE	4

Nota. La tabla contiene los rendimientos relativos con su respectivo puntaje en la segunda columna.

Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Por cuestiones de orden a los criterios de costo, peso, disponibilidad, mantenimiento, almacenamiento, durabilidad y facilidad de llenado se les pondrá CR1, CR2, CR3, CR4, CR5, CR6 y CR7 respectivamente, los resultados se anexan en la Tabla 11.

Tabla 11*Matriz de evaluación de criterios de selección*

CRITERIOS	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6
CR1	1	0.25	0.33	0.33	0.33	0.5
CR2	4	1	3	1	1	2
CR3	3	0.33	1	0.33	1	0.5
CR4	3	1	3	1	3	3
CR5	3	1	1	0.33	1	2
CR6	2	0.5	2	0.33	0.5	1
CR7	2	0.33	0.5	0.33	1	0.33
PUNTAJE	18.00	4.42	10.83	3.67	7.83	9.33
TOTAL						

Nota. La tabla presenta los resultados de la matriz de evaluación de criterios de selección comparándose filas con columnas, teniendo 4 si el criterio es más importante que el otro criterio con el que se lo está comparando, en la última fila se suman los puntajes. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Acto seguido se normaliza la matriz dividiendo cada resultado entre el puntaje total de cada criterio, se anexa la columna de vector de prioridad en la que se hace una sumatoria de los valores de los criterios y añade otra columna de vector normalizado donde se divide el vector de prioridad entre el número total de criterios, que en este caso son 7 y posterior a esto se obtiene la ponderación multiplicando el vector normalizado por 100. Analizando el resultado se establece un orden de prioridad. Los resultados se observan en la Tabla 12.

Tabla 12*Matriz normalizada*

CRITERIOS	CR1	CR2	CR3	CR4	CR5	CR6	CR7	V.P	V.N	PONDERACIÓN
CR1	0.06	0.06	0.03	0.09	0.04	0.05	0.04	0.37	0.05	5.2%
CR2	0.22	0.23	0.28	0.27	0.13	0.21	0.22	1.56	0.22	22.3%
CR3	0.17	0.08	0.09	0.09	0.13	0.05	0.15	0.75	0.10	10.8%
CR4	0.17	0.23	0.28	0.27	0.38	0.32	0.22	1.87	0.26	26.7%
CR5	0.17	0.23	0.09	0.09	0.13	0.21	0.07	0.99	0.14	14.2%
CR6	0.11	0.11	0.18	0.09	0.06	0.11	0.22	0.89	0.12	12.8%
CR7	0.11	0.08	0.05	0.09	0.13	0.04	0.07	0.56	0.08	8.0%
							Total	7.00	1.00	100.0%

Fuente: Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

Los resultados en orden de prioridad de los criterios de selección se observan en la tabla 13.

Tabla 13*Tabla de prioridad, ponderación y justificación de criterios de evaluación*

Número de prioridad	Criterio	Ponderación	Justificación
1	Mantenimiento	26.7%	Es indispensable que el extrusor sea de fácil mantenimiento para evitar atascos
2	Peso	22.3%	Se debe optimizar el peso que soporta y mueve el eje Z para que no haya fallos en el movimiento del prototipo
3	Almacenamiento	14.2%	Se procura tener un almacenamiento con bastante

			volumen de mezcla para evitar detener la impresión
4	Durabilidad	12.8%	Los materiales deben ser robustos y garantizar que el prototipo sea resistente al desgaste
5	Disponibilidad	10.8%	Los materiales y repuestos se deben poder adquirir fácilmente
6	Facilidad de llenado	8.0%	Una vez agotada la mezcla en el almacenamiento se debe poder llenar fácilmente el contenedor
7	Costo	5.2%	No se debe superar el presupuesto asignado al proyecto

Fuente: Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

Establecidas las ponderaciones se procede a evaluar cada concepto acorde a los criterios de selección y su respectiva ponderación. Por lo cual se elabora una tabla en donde se evidencian los resultados. El puntaje que se asignó se describe en la tabla 14.

Tabla 14

Tabla de puntajes de rendimiento

Rendimiento	Puntaje	
0-20%	1	Capacidad de aplicación/ Desempeño/ Implementación/Utilización
20-40%	2	
40-60%	3	
60-80%	4	
80-100%	5	

Nota. La tabla muestra el puntaje de la capacidad de aplicación o desempeño o implementación o utilización asignándole acorde al porcentaje de rendimiento. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Los resultados de la matriz final se muestran en la tabla del anexo B. En los resultados obtenidos, se concluyó que el modelo de extrusor con sistema de tornillo sin fin y corona fue el que mejor se adaptó a los criterios y requerimientos del proyecto. El modelo con correas dentadas también se consideró como una alternativa viable. La implementación de análisis multicriterio facilitó la selección de conceptos y mejoró la eficacia de la toma de decisiones. Además, se observó que los criterios de evaluación y su prioridad fueron relativos a este proyecto y pueden variar según las necesidades de otros prototipos.

El modelo seleccionado utiliza un sistema de tornillo sin fin y corona que presenta varias ventajas en comparación con un extrusor basado en correas y poleas dentadas y el modelo de extrusor con acople directo. Este sistema es de bajo mantenimiento, ya que no requiere ajustes constantes de tensión como las correas. Además, tiene un diseño compacto y ligero, que ahorra espacio y reduce el peso total del sistema. Su durabilidad es elevada, ya que los materiales de la caja reductora NMRV30 que implementa el modelo están diseñados para resistir desgaste, lo cual es ideal para aplicaciones con cargas altas y ciclos continuos. Este modelo también cuenta con un tanque de almacenamiento de 2 litros, que, en el caso del extrusor con acople directo y tolva, no requiere de un operador que esté continuamente vertiendo la mezcla, además se encuentra fácilmente en el mercado, pues su disponibilidad es amplia. Por último, la mezcla se puede llenar desenroscando el tanque de almacenamiento, lo que facilita la recarga y el mantenimiento regular sin necesidad de ajustes complicados. El costo de este extrusor es mayor con respecto a los otros modelos, no obstante, este criterio de selección es el que menos ponderación tiene comparado con los demás criterios.

2.2.4. Selección del material

Como parte del estudio, se decidió usar la arcilla como base fundamental del material que va ser usado en la impresora, iniciamos una serie de pruebas y análisis con el objetivo de encontrar la

proporción óptima de cada componente y evaluar su impacto en la extrusión y la calidad final de las piezas impresas.

Comenzamos mezclando diferentes proporciones de arcilla y goma arábica con agua, ajustando gradualmente la cantidad de cada componente para encontrar la mezcla ideal. La consistencia de cada combinación se evaluó en términos de facilidad de modelado, maleabilidad y capacidad de extrusión. Además, también se toma en cuenta la resistencia de cada mezcla para evaluar su capacidad para mantener su forma y resistir fuerzas externas.

Tabla 15

Tabla de proporciones de mezcla

MEZCLASARCILLA, AGUA, GOMAARABIGA			
MEZCLAS	composición		
	Arcilla	Goma Arabiga	Agua
MEZCLA 1	100gr	15gr	
MEZCLA 2	100gr	20gr	
MEZCLA 3	100gr	25gr	
MEZCLA 4	100gr	30gr	
MEZCLA 5	100gr		15gr
MEZCLA 6	100gr		20gr
MEZCLA 7	100gr		25gr
MEZCLA 8	100gr		30gr

Nota. La tabla muestra las proporciones de arcilla, goma arábica y agua de cada mezcla. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

- Mezcla 1: No se logra obtener una mezcla homogénea.
- Mezcla 2: Se obtiene una mezcla homogénea y maleable, pero se presentan agrietamientos y tiene poca viscosidad.
- Mezcla 3: Se obtiene una mezcla homogénea, con buena viscosidad, no presenta agrietamiento al momento de moldear.
- Mezcla 4: Se obtiene una mezcla homogénea, muy viscosa, pero difícil de moldear ya que presenta un estado muy líquido.

- Mezcla 5: No se logra obtener una mezcla homogénea.
- Mezcla 6: Se obtiene una mezcla homogénea y maleable, pero se presentan agrietamientos y tiene poca viscosidad.
- Mezcla 7: Se obtiene una mezcla homogénea, muy viscosa, pero tiene consistencia
- Mezcla 8: Se obtiene una mezcla homogénea, muy viscosa, pero difícil de moldear ya que presenta un estado muy líquido.

Figura 30

Registro fotográfico de muestras



Nota. Las imágenes muestran cada una de las mezclas hechas a base de arcilla y agua, en orden según la cantidad de agua que tienen. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Con base al anterior estudio realizado teniendo en cuenta factores como, viscosidad, flexibilidad, resistencia, maleabilidad, se opta por usar las mezclas 3 y 7, ya que se pueden evidenciar los factores anteriormente mencionados.

Figura 31

Registro fotográfico de las mezclas seleccionadas



Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Tabla 16

Tabla de características de las mezclas seleccionadas

TIEMPO DE SECADO MEZCLAS					
Mezcla	peso (gr)	S. CALOR	TEMPERATURA	T. Secado (horas)	Alteraciones
Mezcla 3	110	NO	15° a 20°	14	NO
Mezcla 7	110	NO	15° a 20°	22	NO
Mezcla3: 100 gramos de arcilla y 25 gramos de goma arábiga					
Mezcla7: 100 gramos de arcilla y 25 gr de agua					
OBSERVACIONES	MEZCLA 3			MEZCLA7	
	Se obtiene menor tiempo de secado, no se presenta agrietamiento en el bloque			Mayor tiempo de secado, no se presenta agrietamiento en el bloque	

Nota. Tomado de Martínez M. Lagos S & Rosero X. 2024 elaboración propia.

La consistencia fue un factor clave a lo largo de este estudio. Las pruebas iniciaron seleccionando las mezclas que tienen mayor viscosidad y que no tengan problemas como

agrietamientos, según lo anterior se deciden usar las mezclas 3 y 4 de arcilla con goma arábiga y las mezclas 7 y 8 de arcilla y agua, para este estudio se decide usar una jeringa aplicando presión de forma manual sobre una báscula para conocer la fuerza que se aplica al momento de extruir el material y de esta manera comparar con la fuerza que aplica el motor NEMA 23 en el extrusor.

2.2.5. Diseño detallado

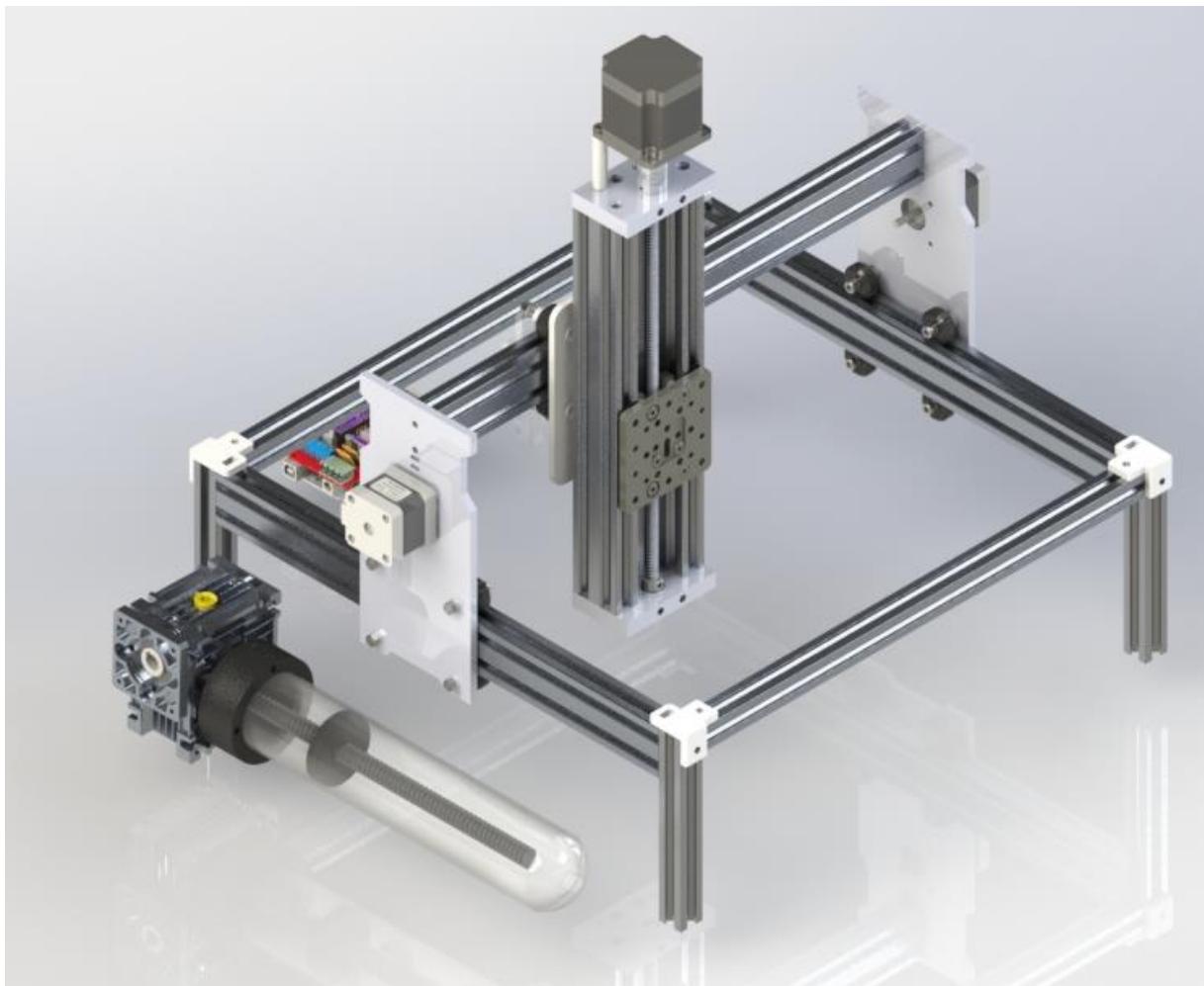
En la fase de diseño detallado, se realizó el modelado CAD completo del ensamblaje general, subdividido en sub ensamblajes correspondientes a cada uno de los ejes y al sistema del extrusor. Esta organización permitió una estructuración clara y eficaz del proyecto, facilitando el análisis y ajuste de cada sección. Se definió el sistema de control y se realizaron cálculos de esfuerzo y análisis de cargas en cada eje para evaluar la capacidad de soportar las condiciones operativas esperadas. Además, se incorporaron las especificaciones de los actuadores, sistemas de transmisión y materiales en función de los requisitos de precisión, estabilidad y durabilidad. Estos análisis permitieron prever el comportamiento del diseño bajo cargas y asegurar su desempeño adecuado, sentando las bases para la posterior fase de fabricación.

2.2.5.1. Creación de modelos CAD.

Para cumplir con los entregables del proyecto, se desarrolló el diseño detallado de cada componente en el software SolidWorks. El diseño se organizó en sub ensamblajes correspondientes a cada eje (X, Y y Z) y un sub ensamblaje específico para el extrusor, lo cual facilitó la estructura del modelo completo y su manipulación dentro del software. Esta estructura modular permite visualizar y analizar cada sección de manera independiente. Los planos detallados de cada pieza y ensamblaje pueden consultarse en el Anexo C, donde se incluye toda la documentación técnica.

Figura 32

Renderizado final del diseño CAD del prototipo



Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

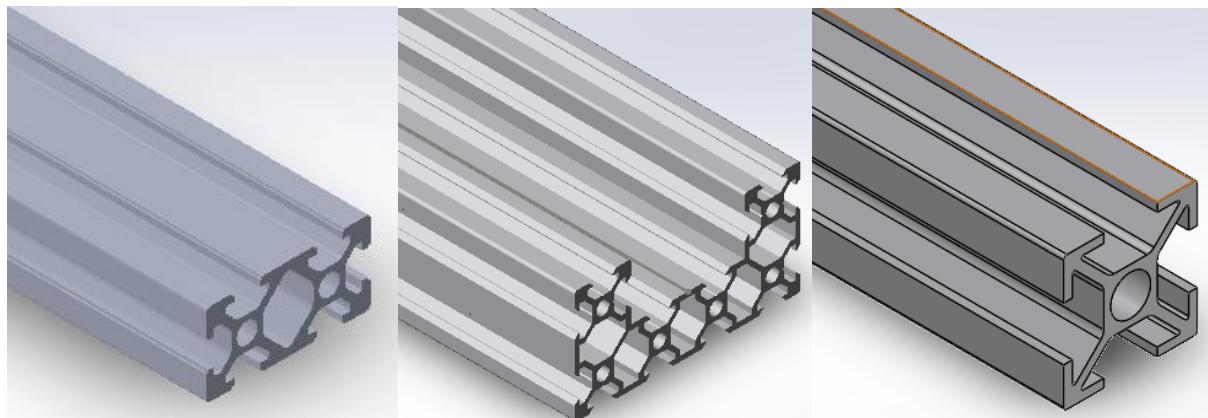
Este enfoque permite optimizar la verificación de cada eje y realizar ajustes sin comprometer el modelo completo, asegurando así que el diseño cumpla con los requisitos de precisión, facilidad de montaje y mantenimiento.

2.2.5.2. Análisis de cargas. En esta parte se realizó un análisis detallado del diseño de un robot cartesiano en desarrollo, centrándose en su estructura mecánica, capacidad de carga, consumo de potencia y aspectos cinemáticos. Se abordará el diseño considerando el espacio de trabajo del robot, la carga que puede soportar y la potencia que consume durante su funcionamiento. Además, se realizará el cálculo del modelo cinemático directo e inverso (MGI y MGD) para comprender y controlar el movimiento del robot de manera precisa. Se incluirán gráficas de simulación de trayectorias circular y lineal para evaluar su desempeño y precisión. Por último, se presentarán los resultados obtenidos. Aunado a lo anterior se anexarán los scripts de programación en Matlab y Simulink, así como el ensamblaje del robot en Solid Works, para ofrecer una visión integral del proceso de diseño y simulación.

Para realizar el análisis de la estructura mecánica se tiene en cuenta primero que todo el material de la estructura. En el caso de este robot cartesiano se eligió como material principal el aluminio 6063 T5, en perfiles de aluminio estructural 2020, 2040 y 4080 tipo C.

Figura 33

Perfiles estructurales



Nota. La imagen de la izquierda muestra un perfil estructural 2040, la imagen del centro muestra un perfil estructural C 4080, y la imagen de la derecha es un perfil estructural 2020. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Las simulaciones de esfuerzos se realizaron en el software SolidWorks. En éste se encuentra la hoja de datos del material observada en la Figura 33.

Figura 34

Hoja de datos técnicos de aluminio 6063 T5

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+10	N/m ²
Coeficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	2.58e+10	N/m ²
Densidad de masa	2700	kg/m ³
Límite de tracción	185000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	145000000	N/m ²
Coeficiente de expansión térmica	2.34e-05	/K
Conductividad térmica	209	W/(m·K)
Calor específico	900	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Nota. La imagen muestra las propiedades técnicas del aluminio 6063 T5 en SolidWorks. Tomado de SolidWorks 2020(S.f).

Del mismo modo, para hacer el análisis de cargas se utilizaron los componentes del modelo, cuyos planos se encuentran en el anexo C, y el renderizado que se muestra en la figura 32. Para hacer el análisis de las cargas que soportan, primero se evaluará uno de los 4 perfiles estructurales que levantan la estructura del piso, para esto se utilizará Solidworks Simulation, los resultados se aprecian en la figura 35.

Figura 35

Cálculos físicos del ensamblaje

Propiedades de masa de robot cartesiano

Configuración: Predeterminado

Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Masa = 3075.61 gramos

Volumen = 2131752.04 milímetros cúbicos

Área de superficie = 1503295.81 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)

X = 232.47

Y = 394.56

Z = 238.12

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el centro de masa.

I_x = (0.85, -0.26, 0.46) P_x = 162639745.47

I_y = (0.51, 0.18, -0.84) P_y = 431810671.17

I_z = (0.14, 0.95, 0.28) P_z = 522944183.94

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de salida.

L_{xx} = 239543993.08 L_{xy} = -71833969.20 L_{xz} = 101311517

L_{yx} = -71833969.20 L_{yy} = 495461933.68 L_{yz} = -56786998.

L_{zx} = 101311517.49 L_{zy} = -56786998.64 L_{zz} = 382388673

Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)

Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

I_{xx} = 892736829.91 I_{xy} = 210269450.38 I_{xz} = 271566696.

I_{yx} = 210269450.38 I_{yy} = 836070592.40 I_{yz} = 232176905.

I_{zx} = 271566696.34 I_{zy} = 232176905.60 I_{zz} = 1027398926

Tomado de SolidWorks. Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

Se tiene una masa de 3,075Kg, por lo que se procede a hallar el peso en N en la ecuación 1.

$$3.075Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} = 30.17N \quad (1)$$

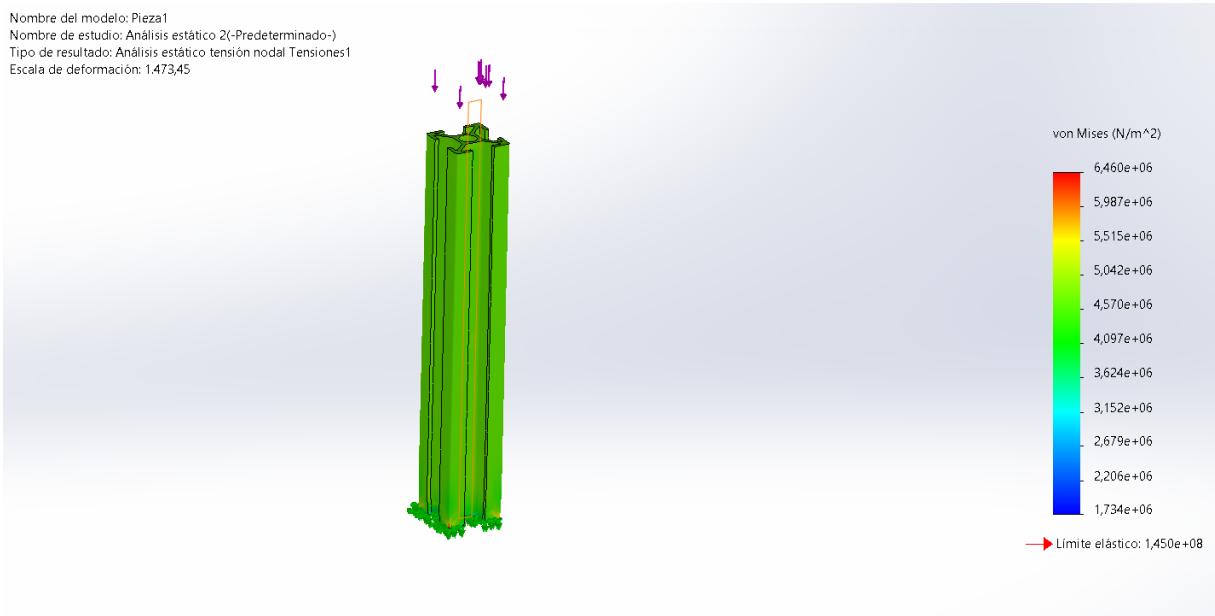
Como el peso se distribuye en los 4 perfiles que sostienen la estructura, se puede hacer de cuenta que se reparte equitativamente en cada uno, por lo que el peso se divide entre 4, como se observa en la ecuación 2.

$$\frac{30.17N}{4} = 7.54 \quad (2)$$

En la siguiente figura 36 y 37 se observan los resultados de los 4 perfiles estructurales que soportan la máquina.

Figura 36

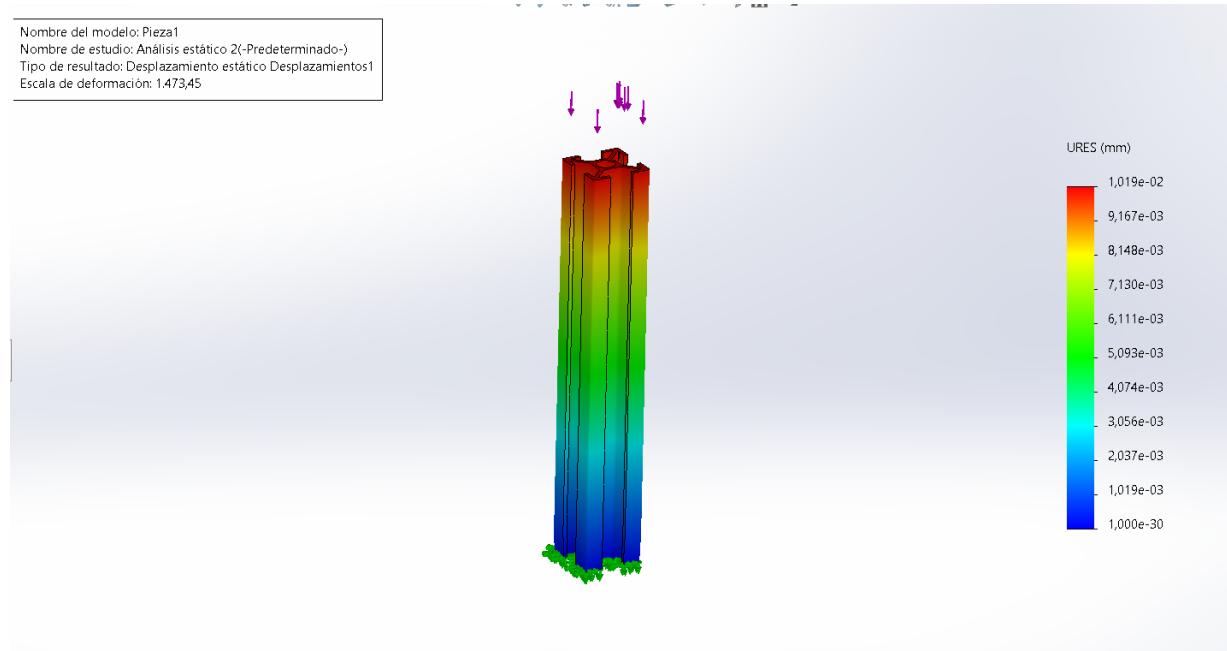
Análisis estático: Tensión nodal



Nota. Tomado de SolidWorks. Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

Figura 37

Desplazamiento estático



Nota. Tomado de SolidWorks. Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.

Como se puede apreciar resiste satisfactoriamente el peso de la carga. El mecanismo de transmisión de movimiento que se elige para la máquina son correas dentadas en el eje X y Y. Para el eje Z se elige transmitir el movimiento a través de un tornillo helicoidal de 4 hilos. Se utilizan rodamientos 625zz para ayudar al movimiento en cada uno de los ejes y disminuir la fricción en los mismos.

En cuanto a la carga que soportan los ejes, se puede evaluar las cargas en los perfiles, sin embargo en estos no se encuentran los puntos críticos, donde pueda fallar el mecanismo, los factores que pondrían los limitantes de la carga son el torque límite que pueden ejercer los motores y la carga que puede movilizar las correas dentadas en el caso del eje X y Y. Por lo anterior se tiene en cuenta la ficha técnica de los dos elementos. La ficha técnica del motor NEMA 17 se encuentra en el Anexo, y la ficha técnica de la correa GT2 se observa en la Figura 38.

Figura 38

Ficha técnica de correa de distribución GT2



SKU: [MCH-1123](#)

Brief Data:

- Belt Pitch: 2mm.
- Belt Width: 6mm.
- Length: 1 meter.
- Shape: Open-Ended Timing Belt.
- Belt Height: 1.38mm.
- Tooth Height: 0.75mm.
- Breaking Strength: 124 lb / 56kg.
- Working Tension: 6.25 lb / 2.8kg.

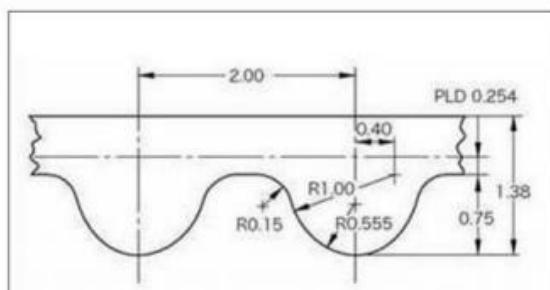
Nota. La imagen muestra las propiedades técnicas de la correa dentada GT2. Fuente Handson Technology (*S.f.*). <https://naylampmechatronics.com/img/cms/000117/000117%20gt2-belt-B.pdf>.

Figura 39

Ficha técnica de correa de distribución GT2

Mechanical Dimension:

Unit: mm



GT 2 Timing Belt - 2 mm Pitch 6 mm Wide											
REFERENCE	Mat/ Finish	Type	Pitch	R ₁	R ₂	R ₃	b	H	h	i	PLD
HT-GT2-06	R/FG/B	GT2	2	0.15	1	0.555	0.4	1.39	0.75	0.63	0.254

Nota. La imagen muestra las dimensiones de la correa dentada GT2. Fuente Handson Technology (S.f) <https://naylampmechatronics.com/img/cms/000117/000117%20gt2-belt-B.pdf>.

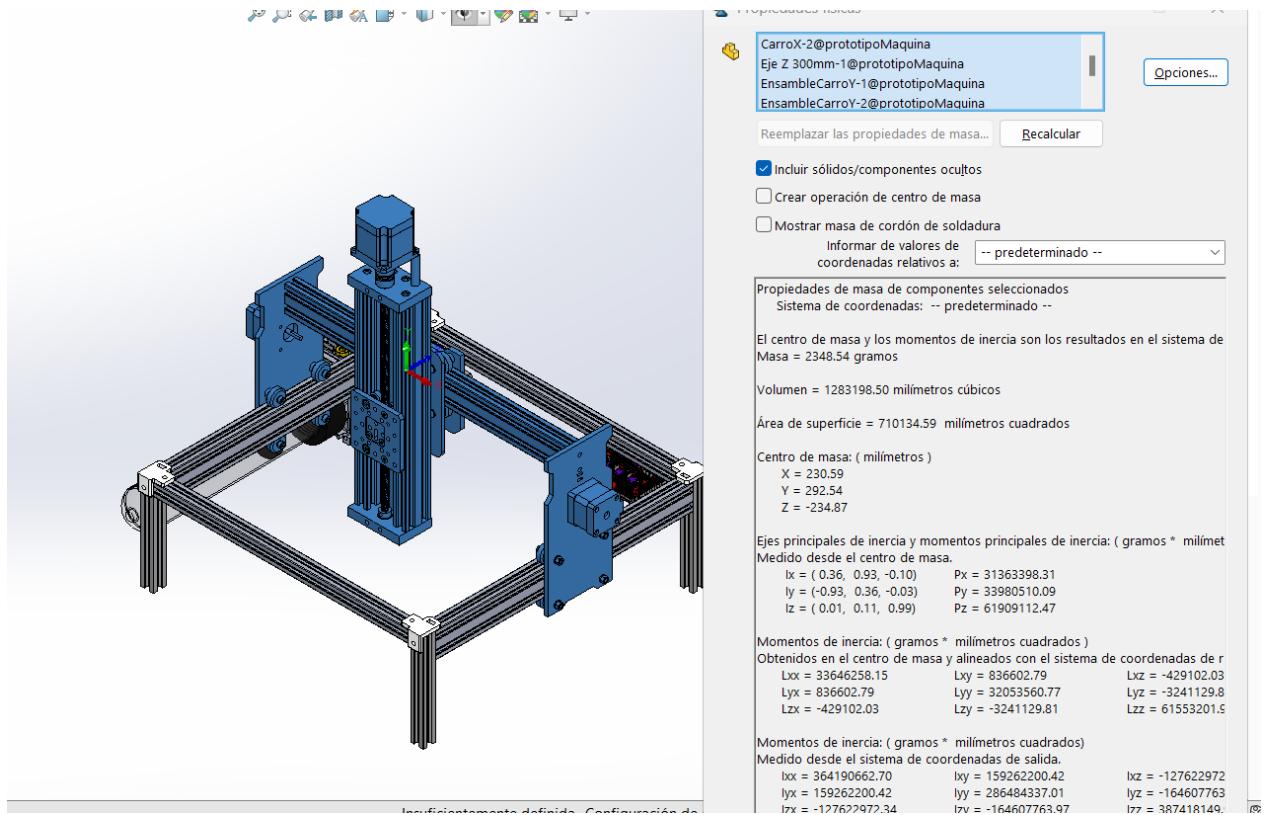
2.2.5.2.1. Cálculo de cargas en el eje Y. Acorde a la ficha técnica la correa GT2 tiene un paso de 2mm, una resistencia a la rotura de 56 Kg y una tensión de trabajo de 2.8Kg. Como se puede apreciar en la figura 32, el diseño del robot cartesiano consta de 2 motores nema 17 en el eje X, que moverán la carga del eje Y y eje Z, debido a que el par de retención de los motores nema 17 son de 40N*cm y en el eje Y hay 2 motores, el punto crítico serían las correas, al ser dos las correas de distribución y cada una tiene una tensión de trabajo de 2.8 Kg la carga máxima que soporta el eje Y se calcula en la ecuación 3.

$$\text{Carga máxima eje Y: } 2.8\text{Kg} * 2 = 5.6 \text{ Kg} \quad (3)$$

Por ende, puede mover la carga satisfactoriamente. Por otro lado, se realizó los cálculos en la viga del eje Y, para lo que se procedió a realizar el estudio de propiedades físicas de la parte de la estructura que soportan las vigas del eje Y, este estudio se aprecia en la figura 40.

Figura 40

Propiedades físicas de las cargas sobre el eje Y



Nota. La imagen muestra las propiedades físicas de las piezas que soporta el eje Y en donde se observa que la masa total es 2348.54 gramos. Tomado de SolidWorks. *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

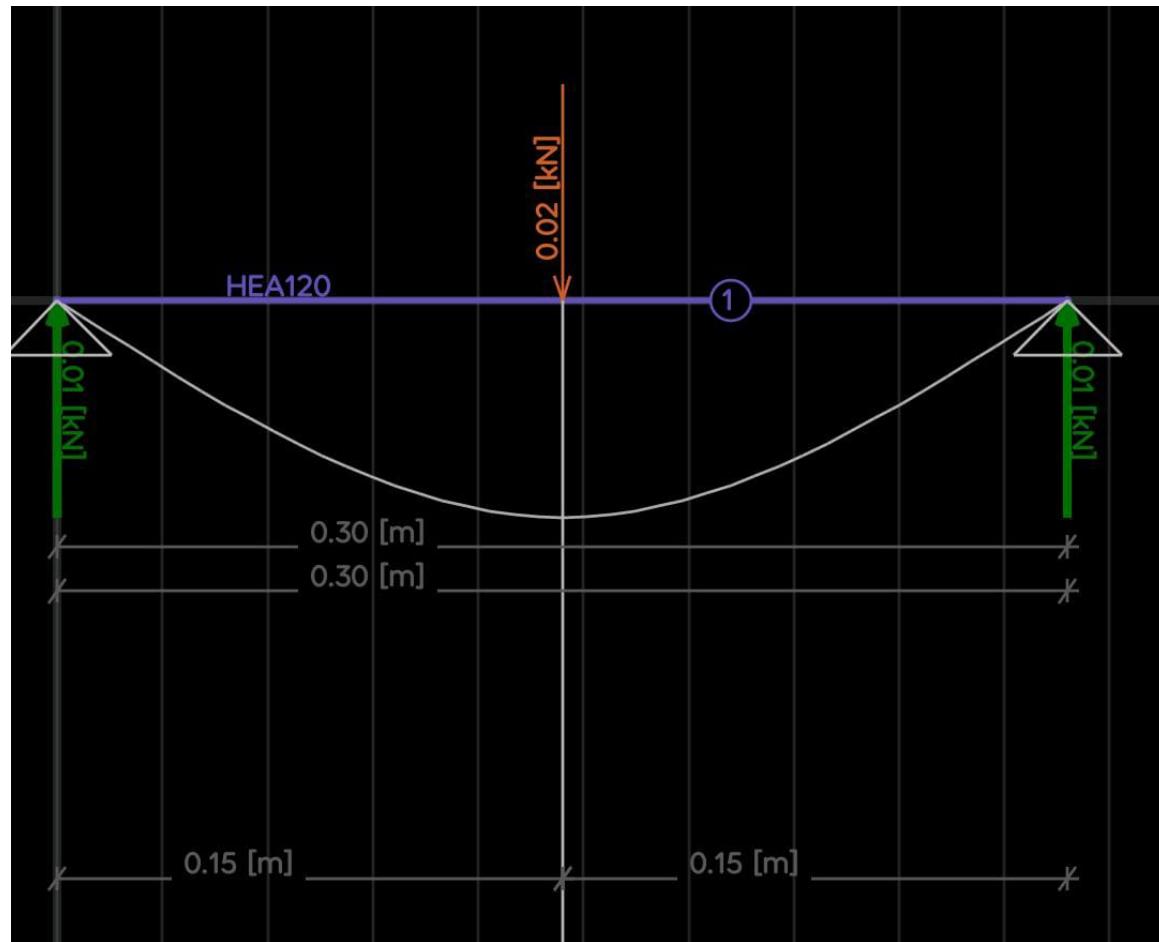
$$W_y = 2.35 \text{ Kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (4)$$

$$W_y = 23.03 \text{ N}$$

De este modo se procede a realizar un diagrama de cuerpo libre, calculando el valor cortante máximo y la flexión máxima para poder determinar los esfuerzos que soporta la viga. El DCL se observa en la figura 41.

Figura 41

Diagrama de cuerpo libre de cargas en el centro del eje Y



Nota. La imagen muestra la carga en el centro de la viga Y con la longitud de la viga (300mm) y el cálculo de las reacciones. Tomado de BeamDesign. *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

La sumatoria de fuerzas en Y se calculan en la ecuación 5.

$$\sum F_y = RA + RB = 23.03 N \quad (5)$$

Respecto a la suma de momentos, como la carga es centrada RA y RB tienen valores iguales. Por lo tanto, RA como RB tienen un valor de 11.515 N apuntando hacia arriba, tal y como se corrobora en la figura 41.

En cuanto al diagrama cortante en el apoyo de la viga RA hasta el centro (de 0 a 0.15m) la fuerza cortante será constante y tendrá un valor de +11.515N, al llegar al centro (punto de aplicación de la fuerza) el valor cortante cae a -11.515N ya que la carga actúa hacia abajo. El momento flector se obtiene en la ecuación 6.

$$M(x) = 11.515 \times x \quad (6)$$

$$M(x) = 11.515 \times 0.15$$

$$M(x) = 1.73Nm$$

El resultado se corrobora en la Figura 42.

Figura 42

Diagrama del cortante y momento flector



Nota. La imagen muestra en la parte superior el momento flector con un resultado de -0.00173 kNm, y en la parte de abajo el diagrama del cortante. Tomado de BeamDesign. *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

2.2.5.2.2. Cálculo de cargas en el eje X. En el caso del eje X, la situación es ligeramente diferente, debido a que el eje X solo soporta la carga del eje Z y el centro de gravedad es cercano a la ubicación del motor Nema 17, por lo tanto, el factor que limita la carga es nuevamente la correa de distribución, pero en este caso, al ser 1, la tensión de trabajo sería de 2.8 Kg.

2.2.5.2.3. Cálculo de cargas en el eje Z. En el caso del eje Z la única carga que debe movilizarse es la del terminal o el extrusor, pero el movimiento es vertical, por lo tanto el peso que mueve es directamente el total del extrusor y de la base junto a los rodamientos y demás elementos móviles. Sin embargo, en este el mecanismo de transmisión de movimiento es un tornillo trapezoidal de acero 304 ASME SA213 Grado 304, y el motor en este caso es un Nema 23 57HD4016-01, por lo que es necesario observar la hoja de datos del motor en el anexo A.

El motor NEMA23 tiene un par de retención de 1.2N*m y el eje Z tiene una longitud de 30cm, por lo que la mayor distancia a la que puede estar el extrusor del motor sería aproximadamente 30cm. El cálculo de la carga máxima se calcula en la ecuación 4.

$$\text{Carga máxima } Z = \frac{1.2N * m}{0.03m} = 4N * 0.101972Kg = 0.41Kg \quad (8)$$

2.2.5.3. Simulación de CNC. Para realizar la simulación del robot cartesiano, como primera instancia se procedió a realizar las relaciones de contactos y fuerzas en el software de SolidWorks, posterior a esto se realizó una simulación cinemática para evaluar el desempeño del prototipo propuesto, asegurando que pueda operar de manera eficiente bajo las condiciones esperadas, considerando las cargas, movimientos y parámetros definidos en fases anteriores. Se utilizó el software SolidWorks para realizar simulaciones cinemáticas y estructurales porque puede integrar modelos CAD con herramientas de análisis dinámico y de tensiones, facilitando la evaluación de todo el diseño. Se realizaron simulaciones para analizar el comportamiento de los ejes durante el movimiento. En particular, se evaluó la estabilidad estructural de los perfiles de aluminio 2040 bajo las fuerzas generadas. Adicional a esto se aplicaron los materiales que corresponden a cada pieza del prototipo diseñada en CAD, lo que asegura que cada eje se simula con la carga correspondiente.

Los resultados mostraron que la estructura soporta las cargas aplicadas con una deformación máxima de 0.01 mm, lo que se encuentra dentro del rango aceptable para garantizar la precisión del sistema. Asimismo, se confirmó que los motores NEMA 17 y NEMA 23 seleccionados son capaces de mover las cargas sin sobrepasar su torque máximo.

2.3. Resultados de objetivo 3

El tercer objetivo específico del proyecto aborda la construcción del prototipo. Una vez definidos y validados los aspectos clave del diseño del prototipo de la impresora 3D para la construcción de viviendas, es esencial llevar a cabo su materialización. Este objetivo específico se centra en la construcción del prototipo, basándose en los planos y modelos detallados previamente desarrollados. La fase de construcción implica la integración de todos los componentes mecánicos, electrónicos y de control, con el propósito de verificar la funcionalidad del diseño y asegurar que cumpla con las especificaciones de rendimiento establecidas en los objetivos previos del proyecto. Durante esta fase, se prestará especial atención a la precisión en el ensamblaje, la fiabilidad de los mecanismos de transmisión y control, así como la adaptación de los materiales seleccionados a las condiciones operativas del prototipo.

En el desarrollo de este objetivo, se procedió a realizar una cotización detallada de las diversas piezas necesarias para la construcción del prototipo, con el fin de planificar su compra posterior. Para garantizar la conformidad con los requisitos del diseño, se verificó que los perfiles estructurales cumplieran con las especificaciones de materiales y dimensiones requeridas. En el caso de los motores NEMA 17 y NEMA 23, se consultaron las hojas de datos de las referencias cotizadas para asegurarse de que los valores de torque, potencia y corriente nominal coincidieran con los parámetros establecidos en los cálculos previos, asegurando así su compatibilidad con el diseño y el rendimiento esperado del sistema. La lista de los materiales finales se encuentra en el Anexo C.

2.3.1. Ensamble del prototipo

Una vez adquiridos los materiales mecánicos se realizó el ensamblaje de la estructura CNC. Primero se comenzó ensamblando la estructura del eje Y, acoplando los 4 perfiles de aluminio estructural V-Slot 2020 de 200mm a 2 perfiles de aluminio estructural V-Slot 2020 de 400mm, perpendicularmente y a 2 perfiles 2040 que son los que portan el carro del eje Y. Las uniones de estos 6 perfiles se realizaron con 8 uniones en ángulo L exteriores tamaño 2028 y 8 uniones internas en ángulo L para reforzar las uniones. Estas uniones se fijaron a los perfiles estructurales con 16 tornillos M5 de 10mm.

Una vez se terminado el ensamblaje de la base, se siguió con el acople de los laterales del eje Y al perfil de aluminio estructural 2040 de 480mm que sirve de guía para el eje X. La unión de los laterales se realizó con dos tornillos M4 de 15mm a cada lado. Estos dos ensamblajes se observan en la figura 43.

Figura 43

Construcción de la base y carro del eje Y



Nota. La imagen muestra el ensamblaje de la base de la estructura mecánica del sistema CNC y apoyada sobre esta el carro del eje Y con sus dos tapas laterales.

Después de estos dos ensamblajes se ubicaron 2 rodamientos 625zz V-slot por encima de cada perfil 2040- 400mm y otros 2 rodamientos por debajo. La unión se hizo con 8 tornillos m5 de 30mm, una tuerca de seguridad, y para los dos rodamientos de arriba de cada lado se utilizaron tuercas excéntricas. Por otro lado, para los rodamientos de la parte inferior se utilizaron espaciadores de 6mm. Las tuercas excéntricas para los rodamientos facilitan el ajuste de los mismos sobre la guía del perfil estructural.

Una vez ubicados los rodamientos del eje Y se ensambló el eje X, en este se ubica la placa posterior y la placa trasera del eje X, entre ella se colocaron otros 4 rodamientos 625zz con un

tornillo m5 de 45mm, con la misma configuración de tuercas excéntricas y espaciadores de un lado, y para el otro lado se utilizaron espaciadores de 4mm, todo esto asegurado con tuercas de seguridad.

Para terminar con el ensamblaje de los ejes X y Y se requiere fijar los motores NEMA 17 en los laterales del eje Y y la placa trasera del eje Z. Estos se fijan con 4 tornillos m3 de 20mm cada uno de los motores. Una vez sujetados se pueden ajustar las poleas dentadas en el eje de salida de los motores. Para cada lado del eje Y se cortó 50 mm de correa dentada y se ubicaron los 4 tensores de correa en cada esquina de los perfiles 2040. La correa se ubica dentro de estos tensores con un sujetador de correa, pasa por debajo de los rodamientos y sube hacia la polea dentada, de modo que cada que gire el eje de salida del motor el carro avance hacia los dos lados. Se tensa la correa y se realizan los mismos pasos con el eje X. El ensamblaje total de estos dos ejes se observa en la Figura 44.

Figura 44

Ensamblaje terminado de los ejes X y Y



Nota. La imagen muestra el ensamblaje terminado de los carros del eje X y el eje Y con sus respectivos motores y correas dentadas.

Acabados los ensamblajes de los ejes X y Y se procede a fijar el eje Z con 4 tuercas en T para perfiles 2040 de 5 mm de diámetro y 4 tornillos m5 de 10mm a la placa posterior del eje X.

2.3.2. Integración de componentes eléctricos

Con el ensamble mecánico y 3 de los 4 motores ubicados en los ejes, el siguiente paso fue fijar el motor nema 23 al eje Z, esto se realizó ubicando 2 espaciadores de 40 mm en las dos ranuras destinadas para el acople del motor en el eje Z. utilizando 2 tornillos M3 de 50mm se ancló el motor y se ajustó el acople flexible al eje de salida del mismo.

Para seguir con la integración de los componentes eléctricos se insertó la shield ramps v1.4 al Arduino mega en las regletas hembras del mismo. Los drivers A4988 se ubicaron en los sockets de los ejes X, Y y E0. Los motores NEMA 17 se conectaron a las regletas hembras de los ejes antes mencionados. En el caso del motor nema 23 se utilizó un driver TB6600 al cual se le realizó su respectiva configuración.

Figura 45

Configuración de driver TB6600



Nota. La imagen muestra los 6 interruptores que tiene el driver TB6600, donde S1, S2 y S3 están en OFF (6400 pulsos por revolución), el interruptor S4 está en OFF, S5 y S6 en ON (salida de 2.5 amperios)

Aunado a lo anterior se fijaron los finales de carrera a los soportes de los finales de carrera y se atornillaron a la estructura a un extremo de cada eje. Estos también se conectaron a la shield en X-, Y- y Z-. Estos finales de carrera se requieren para regresar la punto de partida en el proceso de impresión. Estas conexiones se observan en el Anexo D.

2.3.3. Implementación del software de control

El prototipo requiere un sistema de control capaz de gestionar con precisión los movimientos de los ejes, detectar las posiciones límite a través de finales de carrera, y controlar el funcionamiento del actuador del extrusor. Estas funciones son esenciales para garantizar la coordinación y la eficiencia durante el proceso de operación. Por lo tanto, era crucial implementar una solución que no solo ofreciera un control integral de los parámetros necesarios, sino que también fuera fácilmente configurable para adaptarse a los requerimientos específicos del prototipo.

Inicialmente, se consideró la posibilidad de desarrollar un algoritmo desde cero para personalizar completamente el control del sistema. Sin embargo, existen en la actualidad opciones de software de código abierto con años de desarrollo, pruebas y actualizaciones constantes. Estas soluciones no solo son flexibles, sino que también son compatibles con una amplia variedad de laminadores y sistemas de impresión 3D, lo que las hace ideales para proyectos que buscan un equilibrio entre personalización y eficiencia. Además, muchos modelos comerciales de impresoras 3D utilizan estas plataformas como base para su programación, validando su confiabilidad y rendimiento.

Después de evaluar distintas opciones, se decidió implementar Marlín en su versión 2.1.2.2 como firmware para el prototipo. Marlín es un firmware de código abierto ampliamente reconocido en la industria de la impresión 3D y sistemas CNC. Este software es altamente configurable y ofrece soporte para diversas funciones, como el control preciso de motores paso a paso, gestión de sensores de temperatura, monitoreo de límites de carrera y ajustes avanzados de extrusión. También permite personalizar parámetros esenciales para adaptarse a las características específicas de cada máquina. Su compatibilidad con distintos tipos de hardware y su comunidad activa de desarrolladores lo convierten en una herramienta robusta y confiable, ideal para proyectos de este tipo.

La elección de Marlín no solo reduce significativamente los tiempos de desarrollo, sino que también permite integrar funcionalidades avanzadas de control que son críticas para el desempeño y la calidad del prototipo.

2.3.4 Ensamble del prototipo: Extrusor

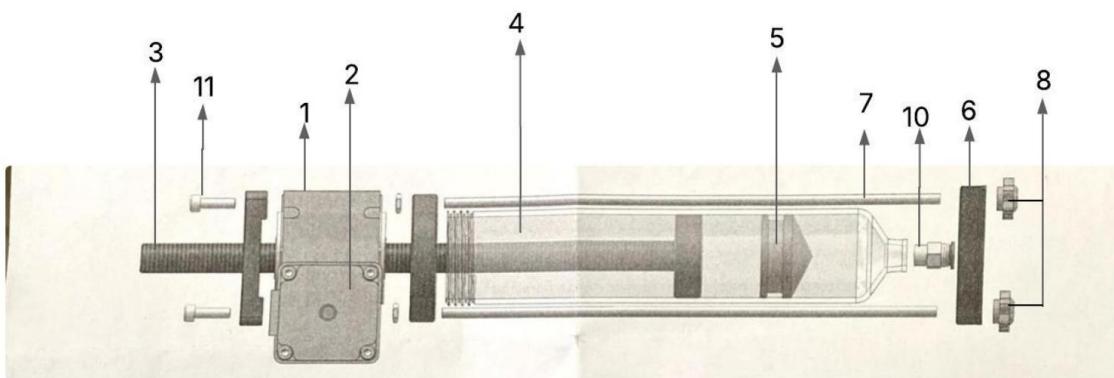
Para la construcción e implementación del extrusor a la máquina CNC se realizó una recolección de materiales los cuales fueron:

1. Una caja reductora NMRV30
2. Un motor NEMA 23: 57hd4016-01
3. Un husillo m18 de 35cm de largo

4. Un Cartucho de polipropileno (PP) de 500 ml: Contenedor principal para la arcilla, con una capacidad de 500 ml y una masa aproximada de 0,8 kg cuando está lleno.
5. Pistón de goma: Encaja dentro del cartucho para empujar la arcilla hacia el sistema de extrusión
6. Base de cartucho: Esta base se fija al cartucho con 2 tuercas para los tornillos M6 ubicados a los laterales del cartucho. Esta base impide que el cartucho avance en el movimiento de extrusión.
7. Tornillos M6x300: Estos 2 tornillos se fijan en los agujeros roscados de la caja reductora NMV30.
8. Tuercas de sujeción en forma de estrella: Estas tuercas se utilizan en los tornillos M6x300 para asegurar la sujeción del cartucho con su base.
9. Driver de motor nema 23
10. Conector de conexión rápida: Este conector se fija en la salida del cartucho, y la rosca neumática permite conectar o desconectar fácilmente el tubo de conexión.
11. Tornillos M6x20 que fijan la brida antirrotación.
12. Tubo de conexión: Tubería que conecta el cartucho con el cabezal de impresión

Figura 46

Enumeración de las piezas del extrusor

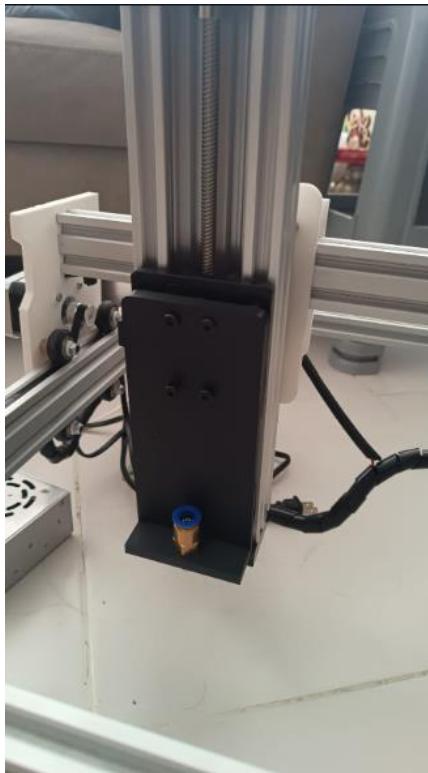


Nota. La imagen indica cada una de las piezas enumeradas con la respectiva lista para lograr identificar mejor los componentes del extrusor, pieza a pieza, Tomada de eazao. (2024, 20 octubre).

Una vez se recolectaron todas las piezas, se realizó el ensamblaje del extrusor. Primero se comenzó enlazando la varilla enroscada al reductor turbo-gusano e instalando la brida con una anti rotación de M6x20, teniendo en cuenta que los terminales de motor y la brida anti rotación deben de estar del mismo lado pues esto nos asegura la eficiencia en el pistón, asegurándonos de tener esta parte en óptimas condiciones y ajustada de manera correcta. Despues se aprietan todas las tuercas de la parte posterior y se atornilla la varilla roscada M6, a continuación, se instala el bloque de empuje y una vez lista esta parte se avanza con la boquilla en la que se encuentra con el asiento de fijación del cartucho, este se gira y se instala el cartucho de polipropileno, se colocó el pistón de goma en el cartucho y procedió a enroscar el conjunto del cartucho en la varilla enroscada M6. Una vez terminado ese proceso, se instaló la brida delantera y se aprietan las tuercas manualmente, por último, de manera conjunta se realizó la instalación de la junta rápida del cartucho para obtener completo montaje del extrusor.

Figura 47

Boquilla del extrusor en eje Z



Nota. En la imagen se muestra la instalación de la boquilla del extrusor en el eje Z de la máquina CNC de impresión 3D

Figura 48

Ensamblaje de cartucho de polipropileno, motor NEMA 23 y tubo de conexión



Nota. En la imagen se muestra la instalación del motor NEMA 23 con el cartucho de polipropileno (PP) de 500 ml

Figura 49

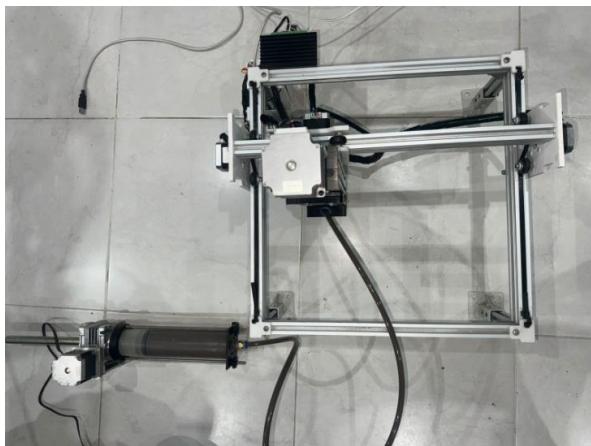
Cartucho de polipropileno y driver motor NEMA 23



Nota. En la imagen se muestra la calibración correspondiente del driver motor con NEMA 23.

Figura 50

Ensamblaje de estructura CNC, extrusor y driver motor NEMA 23



Nota. En la imagen se muestra la máquina CNC completamente ensamblada, la estructura de acero, los ejes, el extrusor, y el tubo de conexión a la boquilla del eje Z

2.4. Resultados del objetivo 4

El cuarto objetivo específico consiste en realizar pruebas de funcionamiento y extraer conclusiones acerca de la factibilidad técnico-económica de la construcción de un prototipo a escala completa, la tecnología que hemos expuesto en el presente documento de grado promete reducir costos, tiempos de construcción y evitar el desperdicio de materiales, para la verificación de estas directrices se sometió el proyecto a ciertos desafíos de funcionamiento puesto que como todo equipo mecatrónico su implementación enfrenta desafíos técnicos, la necesidad de estudios de optimización y pruebas de desempeño, así como también la estandarización mediante normativas y protocolos de control de calidad que aseguren su viabilidad y seguridad.

Para garantizar la viabilidad de la impresión 3D con arcilla, barro y goma arábiga, es necesario llevar a cabo diversos estudios de optimización y pruebas de desempeño.

Uno de los estudios que se consideró importantes en este proceso es la caracterización del material, donde se evaluaron propiedades como la resistencia a la compresión, y flexión de la mezcla utilizada. Esto permitió determinar los límites estructurales del material y definir las condiciones óptimas para su uso en la construcción de viviendas.

Asimismo, se hicieron ensayos de durabilidad del material para argumentar el comportamiento del material ante agentes ambientales como humedad, erosión, cambios de temperatura y exposición prolongada a la intemperie.

También se realizó pruebas de extrusión y deposición que se consideraron esenciales para optimizar la fluidez y cohesión del material durante el proceso de impresión. Estas pruebas definieron los parámetros ideales para la velocidad de impresión, la temperatura y la presión de extrusión, asegurando una deposición uniforme y sin defectos.

Por último, se hizo un estudio fundamental el cual fue el análisis de adherencia entre capas, que evalúa la capacidad del material para fusionarse adecuadamente sin generar puntos de debilidad.

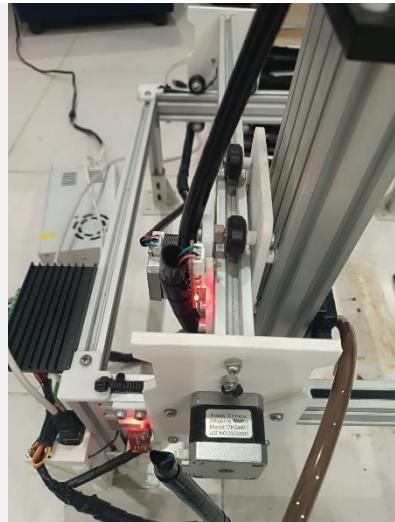
Aunando lo anterior para realizar con satisfacción las pruebas de control, primero se decidió evaluar el control de la máquina, usando el software Marlín en su versión 2.1.2.2, como se evidencia en la siguiente tabla de resultados

Tabla 17

PRUEBAS DE CONTROL

NOMBRE DE LA PRUEBA	Evidencia Fotográfica	Resultado
CALIBRACIÓN Y CONTROL DE MOTORES PASO A PASO		<p>El proceso de calibración de los motores paso a paso se dividió en dos partes. Al inicio se calibró la corriente de los drivers A4988 de cada motor nema 17. Posterior a esto en el firmware se experimentó con distintos valores de pasos y se verificó el avance de cada uno de los ejes para que este avance real corresponda exactamente con el avance ingresado al software. Los pasos por unidad de los motores nema 17 fueron</p>

MONITOREO A LOS LÍMITES DE CARRERA



VELOCIDAD Y ACCELERACIÓN DE DESPLAZAMIENTO EN TRAYECTORIAS

	Velocidad y Calidad	Estructuras	Extrusión	G-Codes	Avanzado
Impresión:	10	15			[mm/s]
Travel:	50	150			[mm/s]
Primera Capa:	10	15			[mm/s]
Perímetro Exterior	10	15			[mm/s]
Perímetro Interior	10	15			[mm/s]
Relleno:	10	15			[mm/s]
Skin Infill:	10	15			[mm/s]

ajustados a 80 y los del motor Nema 23 en 800 por unidad.

Se instalaron los finales de carrera en los extremos de movimiento de la máquina para que al inicio de cada impresión la máquina pueda realizar homing y tener un aprovechamiento óptimo del área de impresión. Los finales de carrera se fijaron a la estructura de la maquina en el sentido negativo del avance y se configuraron para que al ser presionado el switch se mande una señal en alto al controlador y este determine la posición mínima de cada eje. La posición máxima es determinada realizando una medición del avance máximo en cada eje y estas medidas se ingresaron al software para especificar el área de impresión de la máquina.

La velocidad y aceleración de la máquina se determinaron en dos momentos. En el primer momento se configuró en el firmware una velocidad máxima a la que los motores se muevan sin perder pasos evitando que los movimientos bruscos puedan comprometer la estructura o puedan ocasionar vibraciones que afecten la precisión de la máquina la velocidad máxima se estableció en 200mm/s. La aceleración se ajustó manualmente teniendo en cuenta los mismos criterios, esta aceleración es indispensable para un buen acabado de las impresiones y un mayor tiempo de vida útil de los motores. El valor de

ROTACIÓN Y VELOCIDAD DEL EXTRUSOR



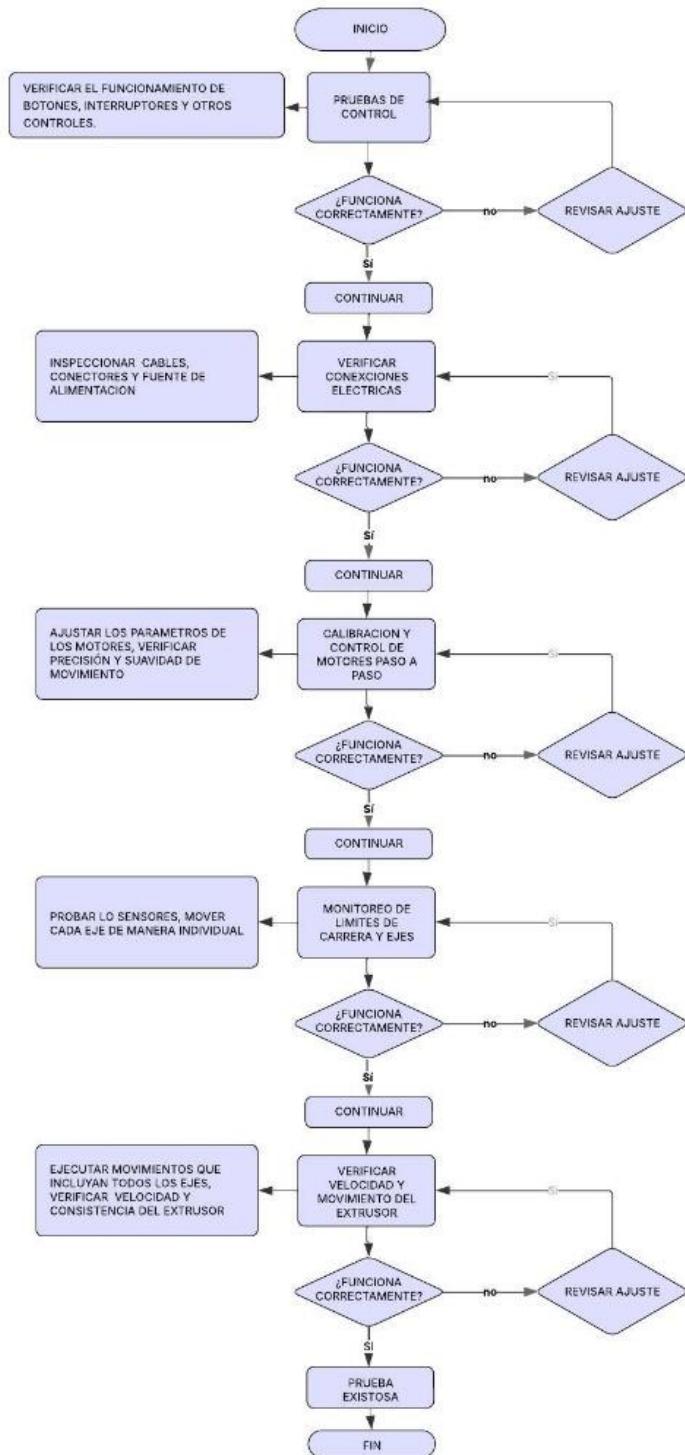
aceleración se estableció en 1000 mm/s^3 para los ejes X y Y. Para el eje Z se estableció una aceleración máxima de 100 mm/s^3 . La velocidad de impresión se configuró teniendo en cuenta la velocidad del extrusor.

El motor Nema 23 del extrusor funciona de manera independiente. Su driver cuenta con un potenciómetro SMD con ranura de ajuste para ajustar la corriente del motor y otro potenciómetro SMD con perilla de ajuste para regular la velocidad. La velocidad se ajusta manualmente primero al vacío. Logrando la mayor velocidad de extrusión sin que la parte mecánica se comprometa. Se ubicó el extrusor a una altura de 15cm del piso y se midió el tiempo que se demoró la mezcla en llegar al piso, el resultado fue de 10,2 segundos. Por lo que se configuró una velocidad máxima de extrusión de 15mm/s.

Nota. La tabla presenta los resultados obtenidos en las pruebas de control con sus respectivos parámetros. *Tabla de elaboración propia*

Figura 51

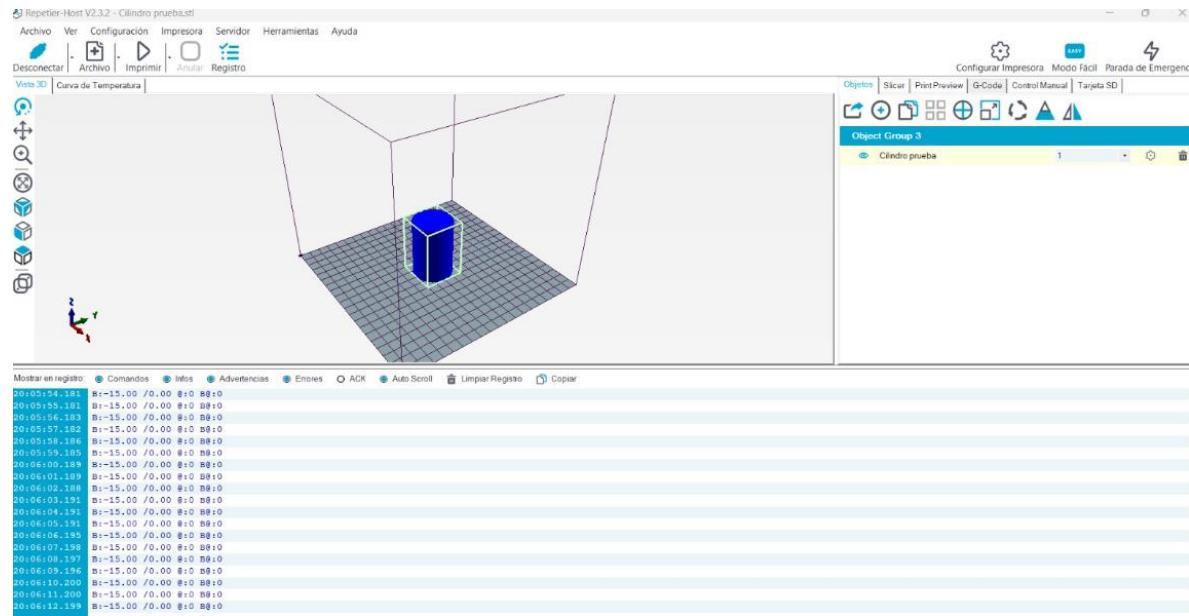
Diagrama de proceso para las pruebas de control



Nota. La imagen muestra el diagrama de procesos que se realiza en cuanto a las pruebas de control y cómo actuar paso a paso conforme se va realizando cada prueba de control. Tomado de *Lucid chart, elaboración propia*.

Figura 52.

Diseño de Pieza en Repetier Host

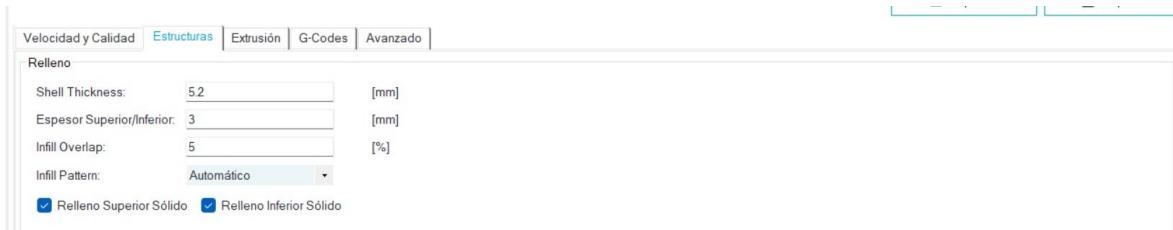


Nota. En la imagen se visualiza la creación de una pieza cilíndrica en el programa repetier host. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia*.

Figura 53.

Parámetros de impresión

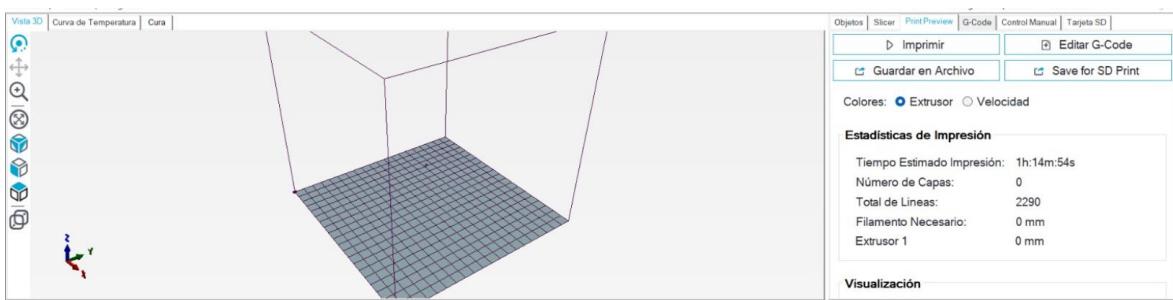




Nota. En la imagen se observa que se ajustan los parámetros de impresión teniendo en cuenta el ancho de extrusión y la velocidad de la máquina considerando que el ancho de extrusión es 2.5mm-Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

Figura 54.

Código G de la pieza cilíndrica



Nota. En la imagen se observa como el programa teniendo en cuenta los parámetros establecidos anteriormente realiza el código g, teniendo como resultado la figura 55. Tomado de *Martínez M,S; Lagos S; Rosero X,A. 2024 elaboración propia.*

A continuación, se realizó pruebas de extrusión las cuales nos ayudó a determinar y asegurar aspectos tales como tener un flujo constante y uniforme verificando que el extrusor está suministrando el material sin interrupciones o variaciones como el grosor, también nos ayuda a determinar la calidad de impresión, el margen de error y la velocidad a la que las piezas pueden ser impresas sacando el máximo potencial de la máquina

Figura 55.

Prueba de extrusión



Nota. En la imagen se muestra una prueba de extrusión provisional, sin ninguna conexión a la estructura de la máquina CNC, para verificar el flujo adecuado del material por el tubo de conexión.

Figura 56.

Prueba de extrusión #1



Nota. La imagen muestra la primera prueba de extrusión, en donde se evidencia como el extrusor realiza una deposición de la primera capa de manera eficiente

Figura 57.

Prueba de extrusión #1 vista lateral



Nota. La imagen muestra un trazo al principio sin interrupciones sin embargo se logra evidenciar una obstrucción en la boquilla, se observa una acumulación de material al terminar el primer trazo.

Para asegurarnos de que la extrusión de piezas sea óptima, se sometió a una serie de pruebas las cuales nos ayudan a validar el funcionamiento y comportamiento de la maquina como se plasman en la siguiente tabla.

Tabla 18.

Pruebas de extrusión

PRUEBAS DE EXTRUSIÓN		
NOMBRE DE LA PRUEBA	Evidencia Fotográfica	Resultado
EXTRUSION AL VACIO	A photograph of a 3D printer's extruder head connected to a blue vacuum adapter, with a brown filament being extruded downwards onto a light-colored surface.	Se realizó una prueba de extrusión al vacío para verificar el flujo de la mezcla por la boquilla teniendo como resultado un flujo constante y sin interrupciones.

EXTRUSION CONTROLADA



Se imprimió una forma geométrica sencilla para corroborar que el caudal y el movimiento de los ejes tiene buenos resultados, teniendo la figura replicada con excelentes resultados.

PRESICIÓN Y REPETIBILIDAD



Una vez impresa la primera forma geométrica se procedió a laminar e imprimir otra forma, en este caso cilíndrica con un mayor número de capas. Se realizó una medición de la variación de las medidas del resultado final con el diseñado. El grosor de las paredes del cilindro se configuró a 5mm y el resultado fue de 5.7mm, teniendo una tolerancia de $\pm 0.7\text{mm}$. El cilindro se replicó para evaluar repetibilidad, teniendo una variación de 0.1mm en la altura con respecto al anterior cilindro. Las demás dimensiones fueron repetidas con éxito.

FUNCIONAMIENTO MECANICO



El extrusor cuenta con una caja reductora que tiene un eje de salida que rota 1 vez por 30 giros del motor. El husillo que tiene en el extremo final el pistón va asegurado con una brida antirrotación en el extremo inicial del husillo. Esta impide que el husillo rote y el eje de salida de la caja reductora hace avanzar o retroceder con éxito al extrusor.

VELOCIDAD DE LA COLOCACIÓN DE LA MEZCLA



CAUDAL DEL INYECTADO



ALTURA DE LA CAPA



La velocidad de la extrusión de la mezcla se realizó variando la velocidad de giro del motor. Esta velocidad de giro se controla girando el potenciómetro que tiene el driver del motor. Se realizaron varias pruebas de velocidad de extrusión en las que la velocidad fuera la mayor sin comprometer las partes mecánicas del extrusor. La mayor velocidad lograda fue de 15 mm/s .

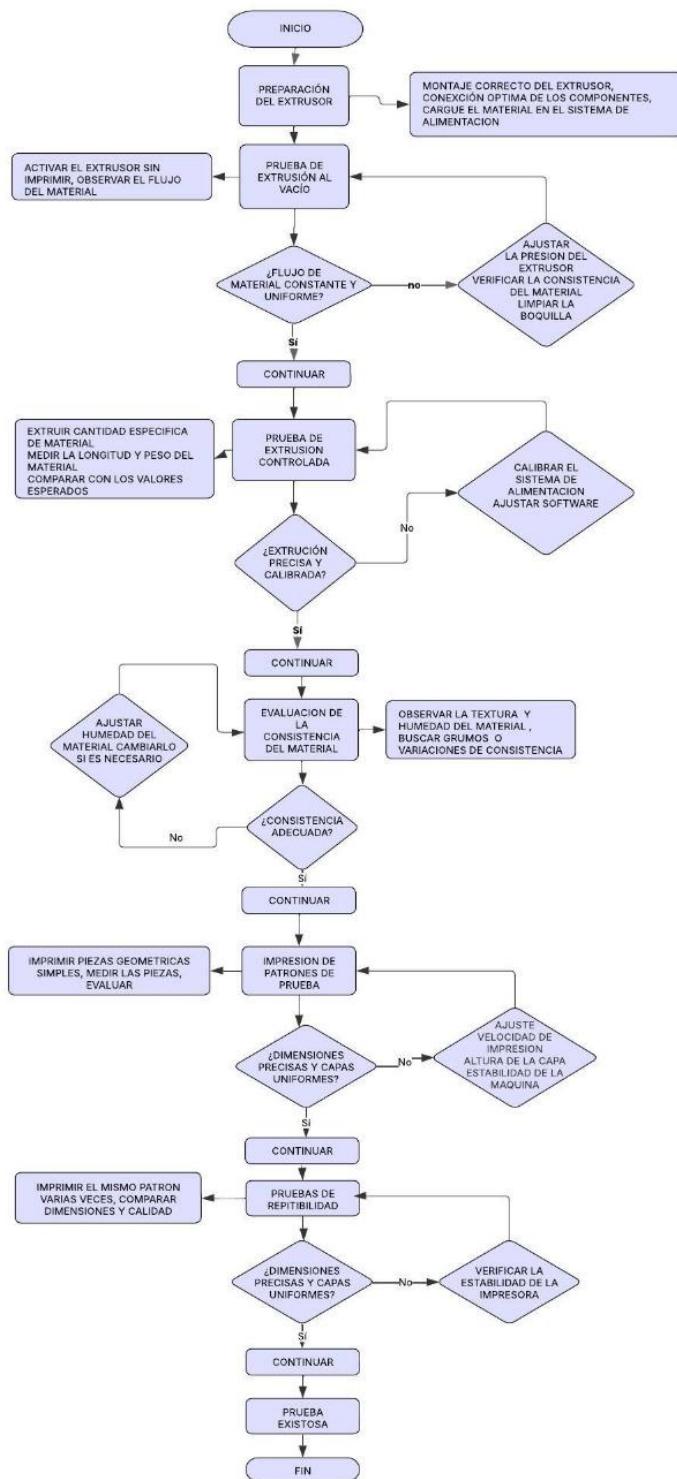
Para calcular el caudal de inyectado utilizamos la fórmula $Q=w \cdot h \cdot v$, donde w es el ancho de extrusión, determinado por el ancho de la boquilla 2.8mm, h es la altura de capa que se definió como 1.4mm y v es la velocidad de impresión que se fijó en 15mm/s. el caudal es de $58.8 \text{ mm}^3/\text{s}$.

La altura de capa se definió teniendo en cuenta que el diámetro de la boquilla del extrusor es de 2.8mm, por ende, se suelen utilizar valores entre el 30% y el 80% de este diámetro. Definimos un valor del 50% es decir, una altura de capa de 1.4mm para mayor adherencia de las capas sin comprometer el tiempo.

Nota. En la tabla se muestran los resultados obtenidos en cada proceso de extrusión y control de extrusor realizado con la maquina CNC. *Tabla de elaboración propia*

Figura 58.

Diagrama de proceso para las pruebas extrusión



Nota. La imagen muestra el diagrama de procesos que se realiza para realizar las pruebas de extrusión. Tomado de *Lucid chart, elaboración propia*.

Además, se realizó pruebas a la mezcla, puesto que el estado óptimo de la misma es un desafío clave para garantizar una extrusión e impresión adecuada en 3D. El material debe fluir y permitir un desplazamiento fácil y constante a través de la boquilla del extrusor sin obstrucciones, pero al mismo tiempo debe poseer suficiente viscosidad para mantener su forma y estabilidad tras la deposición capa a capa. Primero se procesó los componentes de la mezcla a utilizar

Figura 59.

Goma arábiga



Nota. En la imagen se muestra la goma arábiga que es uno de los componentes esenciales para la composición de nuestra mezcla

Figura 60.

Rocas de arcilla



Nota. La imagen muestra una rocas sedimentarias compuestas principalmente por minerales de arcilla

Figura 61.

Arcilla triturada



Nota. La imagen muestra el proceso que se utilizó para triturar las rocas de arcilla, con un martillo, dejando las rocas lo más pequeñas posibles.

Figura 62.

Arcilla Molida y Seca



Nota. En la imagen se muestra arcilla, barro y arena la cual se sometió a un proceso de molienda y secado

Figura 63.

Mezcla base y goma arábiga



Nota. La imagen muestra la mezcla base en combinación con la goma arábiga obteniendo una mezcla homogénea.

Figura 64.

Peso de arcilla y goma arábiga



Nota. La imagen muestra el peso de la mezcla base y goma arábiga que es de 360 gramos ya disminuido el gramaje del recipiente.

Figura 65

Peso de agua



Nota. La imagen muestra el líquido que se usó para la mezcla, 135 gramos de agua, evadiendo el peso del recipiente.

Figura 66

Proceso de la mezcla



Nota. La imagen muestra la unificación de los componentes, mezcla actual tiene 360g de mezcla base (108g arcilla 180g arena y 72g barro). 135g de agua, 15ml de goma arábiga y 8 gramos de fibras finas

Figura 67

Llenado de cartucho de polipropileno



Nota. La imagen indica como se introduce la mezcla manualmente de manera que no entre aire encapsulado y así evitando pequeñas explosiones que causan retroceso en el pistón

Figura 68

Llena de cartucho de polipropileno



Nota. La imagen muestra el relleno de la mezcla de manera manual, se repite el proceso hasta que el cartucho esté con la cantidad de mezcla que se desea.

Figura 69

Pistón de goma y cartucho de polipropileno



Nota. La imagen muestra cómo se ubicó el pistón de goma manualmente que se utiliza para empujar la mezcla de arcilla hacia el sistema de extrusión.

Tabla 19**PRUEBAS DE MATERIAL IMPRESO**

NOMBRE DE LA PRUEBA	Evidencia Fotográfica	Resultado
TIEMPO DE EXTRUSIÓN DE UNA PIEZA GEOMETRICA SENCILLA		<p>El proceso de extrusión de una pieza conformada por 4 capas, con dimensiones de 5 cm x 5 cm, se completó en un tiempo total de 3 minutos y 30 segundos.</p>
TIEMPO DE SECADO DE UNA PIEZA GEOMETRIA SENCILLA		<p>El tiempo estimado para el secado completo de la pieza, cuyas dimensiones son de 5 cm x 5 cm, es de aproximadamente 48 horas. Este período garantiza la correcta evaporación de la humedad, permitiendo que el material alcance propiedades mecánicas y estructurales óptimas.</p>
TIEMPO DE EXTRUSIÓN DE UNA PIEZA DE 10 CAPAS		<p>El proceso de extrusión de la pieza cilíndrica, compuesta por un total de 10 capas, tuvo una duración de 7 minutos y 50 segundos. La geometría del cilindro corresponde a un diámetro de 3.5 centímetros y una altura de 1.5 centímetros, dimensiones que fueron impresas de manera continua y uniforme durante toda la operación.</p>

VELOCIDAD DE EXTRUCIÓN DE UNA PIEZA DE 10 CAPAS



La velocidad de extrusión empleada durante la fabricación de la pieza fue de 10mm/s, que previamente se configuró variando la velocidad del giro del motor

TIEMPO DE SECADO DE LA PIEZA DE 10 CAPAS



El tiempo de secado para la pieza de 10 capas fue de 48 horas, este período garantiza la correcta evaporación de la humedad, permitiendo que el material alcance propiedades mecánicas y estructurales óptimas.

Nota. La tabla muestra cada una de las pruebas a la que fue sometido el material de impresión, explicando a detalles sus cambios y su comportamiento. *Tabla de elaboración propia.*

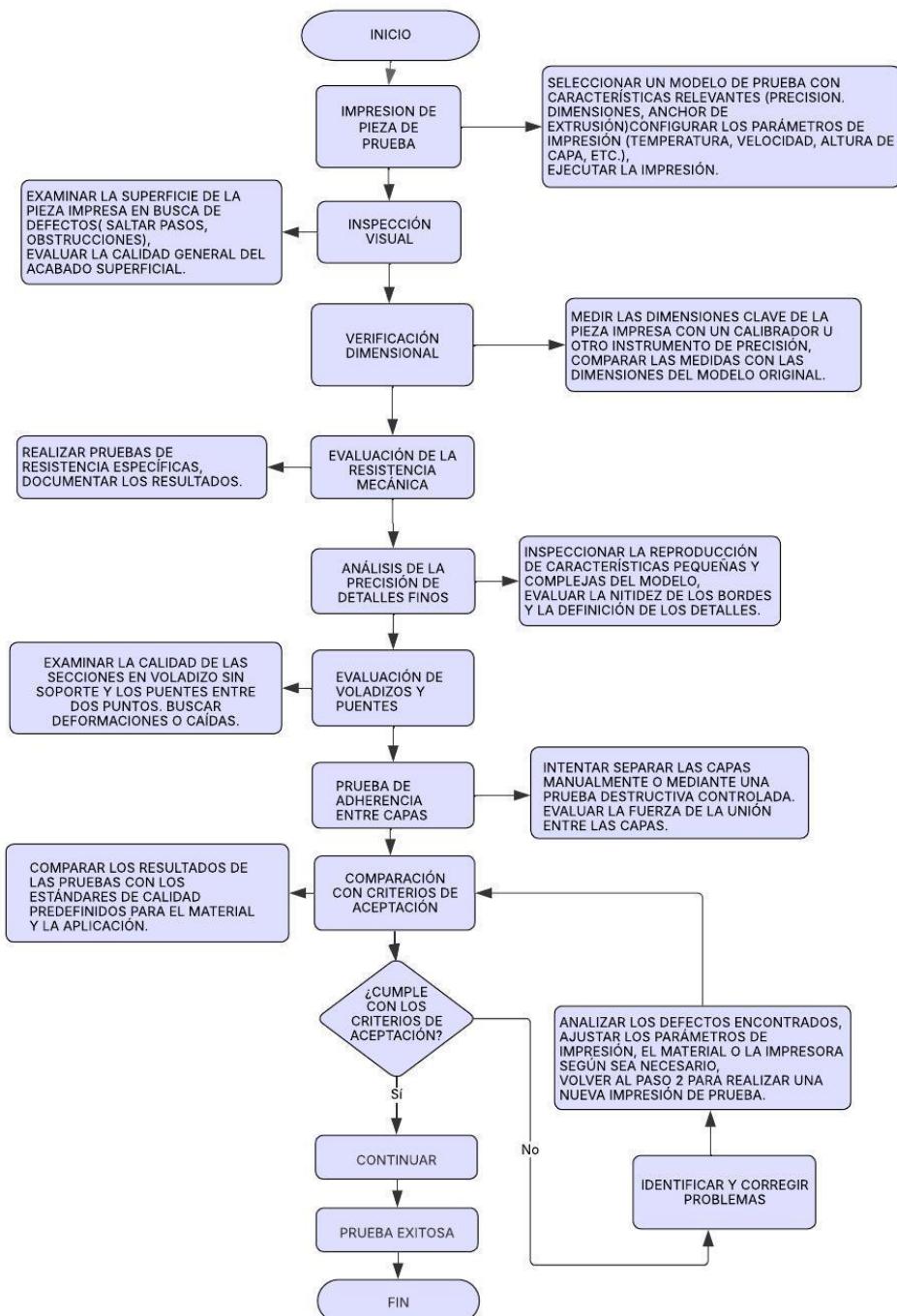
Tabla 20

Dimensiones teóricas piezas (mm)	Dimensiones reales de las piezas impresas (mm)	Desviacion (mm)	%Error
30.0	29.6	0.4	1.33
150.0	148.2	1.8	1.20
5.2	5.2	0.0	0.00
40.0	39.2	0.8	2.00
50.0	49.1	0.9	1.80
Promedio		1.27	

Nota. La tabla muestra el cálculo del porcentaje de error teniendo en cuenta las dimensiones de las piezas impresas respecto a las teóricas. *Elaboración propia.*

Figura 70

Diagrama de proceso para material impreso



Nota. La imagen muestra el diagrama de procesos que se realiza para realizar las pruebas de impresión para una pieza. Tomado de *Lucid chart, elaboración propia*.

3. Conclusiones

Tras el desarrollo del prototipo de una impresora 3D para la construcción de viviendas de interés social, se concluye que el diseño propuesto cumple con las especificaciones de desempeño establecidas. Las pruebas realizadas con el prototipo, construido a escala 1:10, evidencian un funcionamiento eficiente, logrando impresiones consistentes a una velocidad de 15 mm/s. La altura de capa de 1.6 mm y el ancho de línea de 2.8 mm permitieron realizar estimaciones aproximadas del comportamiento de la máquina a escala real.

Mediante un escalamiento lineal, se estimó que la impresora a tamaño completo podría operar a una velocidad de 150 mm/s. Tomando como referencia el área mínima exigida por la normativa colombiana para una vivienda de interés prioritario (VIP), que es de 36 m², y considerando una altura de muros de 2.4 metros, se calculó un volumen total de material a extruir de aproximadamente 1.61 m³. Con una tasa de extrusión de 0.000063 m³/s, la máquina podría construir los muros perimetrales de la vivienda en un tiempo estimado de 7.1 horas de impresión continua, sin incluir tiempos de fraguado ni interrupciones operativas.

Un aspecto destacable es que el error dimensional promedio entre las piezas impresas y las medidas teóricas fue de 1.27 %, lo que demuestra un alto grado de precisión y repetibilidad en el proceso de impresión. Este margen de error es aceptable dentro de los estándares de impresión 3D para construcción y respalda la fidelidad estructural de los modelos que podrían replicarse a escala real.

Estos resultados evidencian la viabilidad del sistema propuesto como una alternativa de bajo costo y alta eficiencia para la construcción automatizada de viviendas sociales, especialmente al emplear materiales sostenibles como arcilla y barro, que reducen el impacto ambiental frente a métodos tradicionales.

Cabe aclarar que estas estimaciones se realizaron mediante escalamiento lineal, válido para magnitudes como longitud y velocidad. Sin embargo, propiedades como el volumen, la masa, la resistencia estructural y el comportamiento del material a escala real requieren un análisis técnico más riguroso. Aun así, la precisión, repetibilidad y estabilidad del prototipo indican que las estructuras diseñadas pueden replicarse con éxito a escala completa.

3.1. Mejoras del prototipo

Se identificaron diversas oportunidades de mejora que podrían optimizar el rendimiento del prototipo. Una de las propuestas es la incorporación de un eje acerado que recorra longitudinalmente el eje Y de la impresora, fijado a ambos extremos y conectado al carro del eje Z mediante un rodamiento lineal. Esta modificación busca minimizar el pandeo y las vibraciones durante el proceso de impresión, mejorando la precisión dimensional.

Otra mejora relevante consiste en el rediseño de un shield personalizado para Arduino Mega, que integre el control de los cinco motores del sistema, permitiendo unificar la gestión del movimiento y la extrusión. De este modo, se facilitaría el control del flujo de material desde el software, eliminando la necesidad de activar la extrusión manualmente.

En cuanto al sistema de extrusión, se plantea aumentar el diámetro del tubo conductor del material para permitir un mayor caudal con menor resistencia, lo cual, junto con una boquilla de mayor calibre, permitiría acelerar la velocidad de extrusión. Esta modificación reduciría considerablemente el tiempo total de impresión, haciendo más eficiente el proceso de construcción.

4. Referencias

- Akankpo, A., & Stephen, J. (2016). *Advances in physics theories and applications*, 53, 18-22.
- International Knowledge Sharing Platform
<https://www.iiste.org/Journals/index.php/APTA/issue/view/2415>
- Alarcón Linares, L. R. (2019). *Sistema de bombeo del concreto hidráulico para mejorar la productividad en edificaciones multifamiliares de altura en Lima Metropolitana, año-2019*.
<https://hdl.handle.net/20.500.14138/2582>
- All3DP. (2022, Febrero 16). *All3DP. Tipos de impresoras 3D: las 7 tecnologías de impresión 3D*. <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>
- Arduino, G. (2021, Febrero 2). *Mira esta casa creada a partir de impresión 3D con suelo local como material principal*. <https://cnnespanol.cnn.com/video/casa-impresa-tres-dimensiones-3d-italia-wasp-sustentable-clix-guillermo-arduino-cnne/>
- Banzi, M., & Shiloh, M. (2016). *Introducción a arduino: La plataforma de código abierto para la creación de prototipos electrónicos*. Obtenido de Make Books:
<file:///C:/Users/roser/OneDrive/Documentos/355878019-Introduccion-a-Arduino-Massimo-Banzi-trad-por-Mikeas-Micelli-docx.pdf>
- Bas Wijnen, G. C. (2019, abril 28). *Free and open-source control software for 3-D motion and processing*. <https://hal.science/hal-02113510>
- Bazalski, V. H. (2023, febrero 20). *Desing of an Extruder for a Concrete 3D Printer*.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/384664/etseib-template-design-of-an-extruder-for-a-concrete-3d-printer.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- BBC. (2014, Abril 25). *China: Una empresa imprime en 3D 10 casas de tamaño real en un día*. Obtenido de <https://www.bbc.co.uk/news/blogs-news-from-elsewhere-27156775>
- BLVPstruder. (2022). *CAD de un extrusor de una pieza*.
<https://www.thingiverse.com/thing:5255344>.

- Castiblanco, I. (2015, Octubre 8). *Impresión 3D de gran escala. ¡10 casas en un día!*. Obtenido de La Republica. <https://www.larepublica.co/economia/impresion-3d-de-gran-escala-10-casas-en-un-dia-2309811>
- Castro, C. (2021, julio 15). *Impresión 3D como método constructivo alternativo, la Casa Henfel*. Obtenido Universidad Politécnica de catalunya Barcelonatech <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/350689>
- CEMEX. (2023, julio 11). *Cómo funciona la impresión 3D en la industria de la construcción*. <https://www.cemexventures.com/3d-printing-in-construction/>
- Chenyu, C., Dong-ce, S., Zhi, L., & Hengyu, Z. (2022). *A brief review of 3D printed concrete*. <https://scholar.archive.org/work/e7xup66o7zgg7b4mhnvb3a3wti>
- Concreto. (Abril de 2021). *Conozca la primera impresora 3D gran formato de concreto en Colombia* Obtenido de Concreto. <https://concreto.com/sala-de-prensa/conozca-la-primer-impresora-3d-gran-formato-de-concreto-en-colombia/>
- Contreras, L. (2023, mayo 12). *Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesiana, Polar y Brazo robótico* Obtenido de 3D natives. <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/>
- Creality (2024) *Ender-3 V3*. <https://www.creality.com/es/products/ender-3-v3>
- Custom 3d printer (2021), *CAD de un robot cartesiano en perspectiva isométrica* <https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1>.
- Custom 3d printer (2021), *Sistema de piñón y cremallera* GrabCad. <https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1>.
- DANE. (2020, enero 28). *Perspectivas territoriales de desarrollo socioeconómico*. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-desarrollo-territorial/280120-Info-Regional-Pasto.pdf>

DANE. (2023, abril 20). *Encuesta nacional de calidad de vida* - <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2022>

Eazao (s.f.) *Manual de usuario Eazao Potter*. <https://www.eazao.com/>

Hadeer Abdalla, K. P. (2021, octubre 29). *Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/21/11978>

Handson Technology (S.f) *las propiedades técnicas de la correa dentada GT2*. Fuente. <https://naylampmechatronics.com/img/cms/000117/000117%20gt2-belt-B.pdf>.

Haidong, T., Zhenyun, W., Alireza, B., Nabil, B. K., Ayaz, A., & Yasin, O. (2023). *Recent advancements and future trends in 3D concrete printing using waste materials*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165923000698?via%3Dihub>

Hanifi Binici, M. K. (2008). *Mechanical properties of clay with fibers used in mud bricks*. https://www.researchgate.net/publication/327681917_Mechanical_Properties_of_Clay_with_Fibers_Used_in_Mud_bricks

Hodgkinson, T. (2020, marzo 28). *Arduino Uno, open source microcontroller development board, isolated on a white background*. Obtenido de Alamy. <https://www.alamy.es/durban-sudafrica-marzo-28-2020-arduino-uno-placa-de-desarrollo-de-microcontrolador-de-codigo-abierto-aislada-sobre-fondo-blanco-image360010176.html>

Ibrahim, I., Eltarabishi, F., Abdalla, H., & Abdallah, M. (2022). *3D Printing in sustainable buildings: systematic review and applications in the United Arab Emirates*. <https://doi.org/10.3390/buildings12101703>

Igus Motion Plastic. (S.f), *CAD de un robot cartesiano de 3 grados de libertad*. <https://www.igus.es/info/modulos-lineales-economicos>

Igus Motion Plastic (S.f). *sistema de acople del eje Y*, <https://www.igus.es/info/modulos-lineales-economicos>

Jeevan GB . (2020, Agosto 11). *L298N DC stepper motor driver side view on white background*. <https://www.alamy.com/l298n-dc-stepper-motor-driver-side-view-on-white-background-image426135385.html>

Made in china (s.f) robot cartesiano de 3 grados. https://es.made-in-china.com/co_fyfumotion/product_Multi-Axis-Table-Xyz-Stage-Indutrial-Cartesian-Coordinator-Robot_osyueoseg.html.

Marchante, A. (2021, enero 12). *Startup3D: ICON y su enfoque de la impresión 3D en la Luna*. Obtenido de 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/startup3d-icon-impresion-3d-luna-120120212/#!>

Mario Coccinella Architects. (2021). *The first eco-sustainable housing prototype 3D printed from raw earth*. <https://www.mcarchitects.it/en/projects/tecla-technology-and-clay>

Martí, J., Yepes, V., & González, F. (2014). *Bombeo de hormigón para sistemas estructurales* Obtenido de Universidad Politecnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2015/04/05/bombeo-de-hormigon-para-sistemas-estructurales/>

Mediasculp. (2019, enero 12). *LCD display connected to a microcontroller displaying the text Internet of things*. Obtenido de Alamy: <https://www.alamy.es/pantalla-lcd-conectado-a-un-microcontrolador-de-mostrar-el-texto-internet-de-las-cosas-image234553964.html>

Michael Ovseychik . (s.f.). *Dreamstime*. <https://es.dreamstime.com/los-microcontroladores-en-el-estuche-dip-son-ligeramente-inferiores-tama%C3%B1o-la-placa-base-del-tablet-casos-de-pl%C3%A1stico-muy-image233381551>

Mike Lynch (31 de 08 de 2022). *CNC o control numérico por computadora: qué es y cómo funciona*. Obtenido Modern Machine <https://www.mms-mexico.com/articulos/cnc-o-control-numerico-por-computadora-que-es-y-como-funciona>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Reglamento colombiano de construcción sísmico resistente.

[https://www.andi.com.co/uploads/reglamento_colombiano_construccion_sismo_resistent
e_636536179523160220.pdf](https://www.andi.com.co/uploads/reglamento_colombiano_construccion_sismo_resistent_e_636536179523160220.pdf)

Ministerio de vivienda. (2022, agosto 10). *Vivienda de Interés Social - SGR*
[https://www.minvivienda.gov.co/ministerio/planeacion-gestion-y-control/sistema-
general-de-regalias/lineamientos-para-presentacion-de-proyectos/vivienda-de-interes-
social-sgr](https://www.minvivienda.gov.co/ministerio/planeacion-gestion-y-control/sistema-general-de-regalias/lineamientos-para-presentacion-de-proyectos/vivienda-de-interes-social-sgr)

Ministerio de vivienda. (2023, junio 2). *Vis y vip.*
<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda/vis-y-vip>

Morph. Z. (2021) *CAD de un extrusor de una pieza.* Obtenido de. Grabcad
[https://grabcad.com/library/zmorph-extruder-for-ender3-1.](https://grabcad.com/library/zmorph-extruder-for-ender3-1)

Norton, R. (2008). *Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines* (4ta Edición ed.). México D.F: McGraw-Hill.

Ollero Baturone, A. (2001). *Robótica: manipuladores y robots móviles.* Barcelona:
Marcombo, S.A.

Pablo, L. (2023, noviembre 6). *Las arcillas. I. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales.* Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/44173956>

Peñín, L. F., Barrientos, A., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de robótica* (Segunda ed.). Madrid, España: McGraw Hill.

Prusa Research. (2021). *Tipos de impresoras y sus diferencias.* Obtenido de
https://help.prusa3d.com/es/article/tipos-de-impresoras-y-sus-diferencias-_112464

Righi, M. (2019). *Impresión 3d con un extrusor de arcilla.*
[https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Impresion-3d-con-un-extrusor-de-
arcilla_fig3_334214226](https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Impresion-3d-con-un-extrusor-de-arcilla_fig3_334214226)

Rivera, G. (2008). *Manejabilidad del concreto.*
<https://www.academia.edu/download/36296351/slum.pdf>

Terra universal. (S.f). *PlateCrane EX and EX360 by Hudson Robotics*.
<https://www.laboratory-equipment.com/platecrane-ex-ex360.html>

Vanegas Useche, L. V. (2018). *Diseño de elementos de máquinas*. Obtenido de Universidad Tecnologica de Pereira. <https://doi.org/10.22517/9789587223019>

Winsun3D. (2003). *Wisun3D*. Obtenido de Winsun3D: [http://www.winsun3d.com/En/About/Whoold, C. \(2021\), CAD de un extrusor de una pieza . GrabCad. Obtenido de. https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1.](http://www.winsun3d.com/En/About/Whoold, C. (2021), CAD de un extrusor de una pieza . GrabCad. Obtenido de. https://grabcad.com/library/custom-3d-printer-for-printing-clay-paste-1.)

Yi Wei, D. T., Biranchi, P., Suvash, C. P., & Noor, N. A. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>

Yiming Peng, C. U. (2023, marzo 1). *Desarrollo de aglutinantes cementosos alternativos para aplicaciones de impresión 3D: una revisión crítica de los avances, ventajas y desafíos*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836822008654>

Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2019). *A review of the current progress and application of 3D printed concrete*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X19302829?via%3Dihub>

ANEXOS

Anexo A. Hoja de datos de motor NEMA 17 y NEMA 23



Datasheet Rev. 5.2

NEMA 17, NEMA 23 and NEMA 34



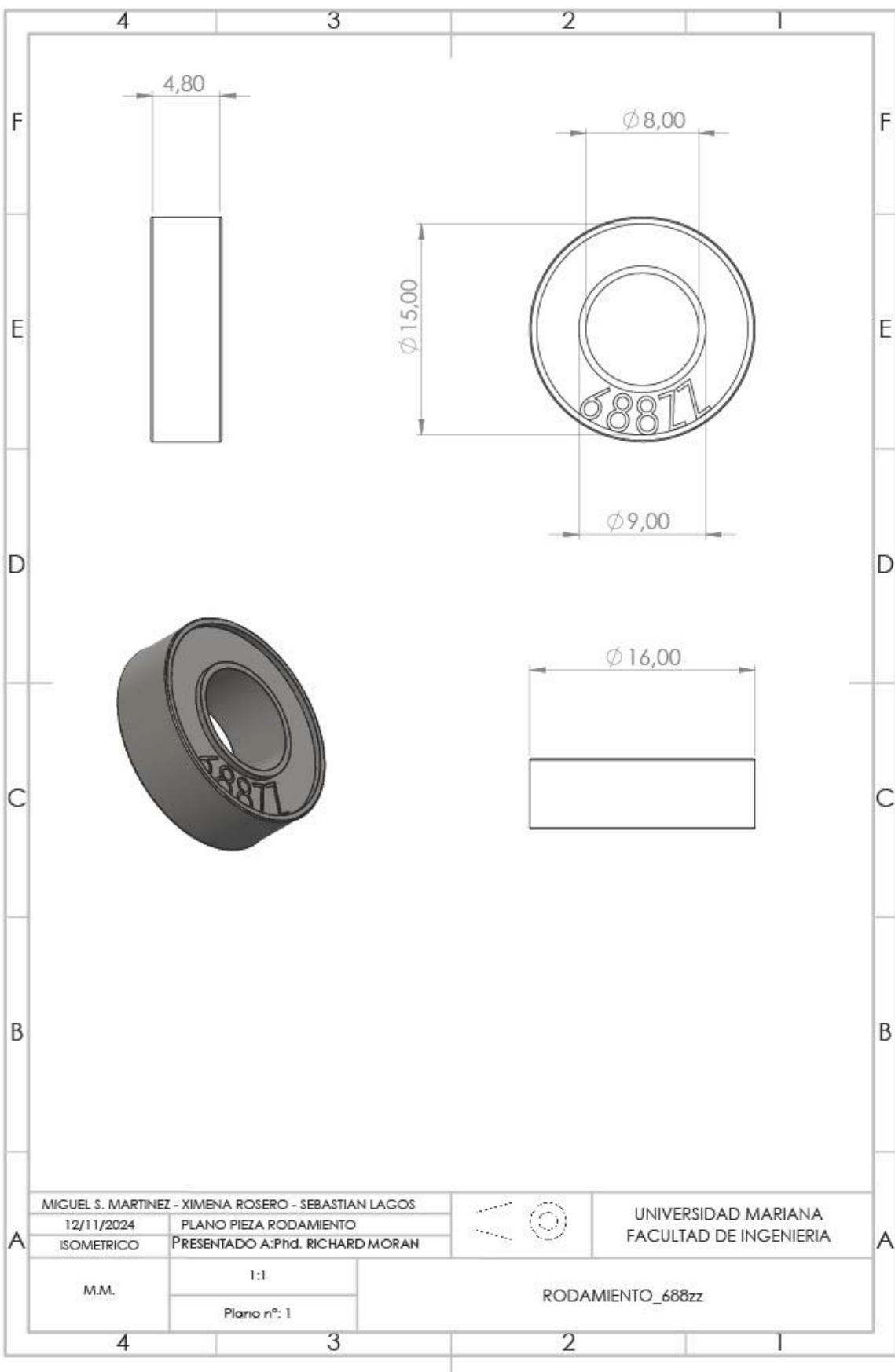
		IP 20			IP20			IP65			IP20		IP65	
NEMA		17S	17M	17L	23S	23M	23L	23S	23M	23L	34M	34L	34M	34L
Input Power, Nominal ($\pm 10\%$)	VDC	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–48	14–75	14–75
Auxiliary Input Power, Nominal ($\pm 10\%$)	VDC	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24	6–24
Auxiliary Input Power, Maximum	W	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Detent Torque	mNm	15	25	25	40	70	120	40	70	120	250	350	250	350
Thrust Load Limit	kg	0.28	0.36	0.6	0.6	1.0	1.5	0.6	1.0	1.5	2.7	3.8	2.7	3.8
Overhung Load Limit (from shaft end)	N	20	20	20	50	50	50	50	50	50	260	260	260	260
Rotor Inertia	g·cm ²	57	82	123	260	460	750	260	460	750	1850	2750	1850	2750
Holding torque at continuous current	Nm	0.35	0.45	0.65	1.1	1.8	2.6	1.1	1.8	2.6	3.5	5.5	5	7.7
Holding torque at peak current	Nm	0.5	0.6	1.05	1.3	2.1	3.25	1.3	2.1	3.25	4.5	7	6.3	9
Continuous Output Current	A	1.8	1.8	1.8	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	7	7	7	7
Peak Output Current (application dependent)	A	3.5	3.5	3.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Step Angle	deg	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Magnetic Encoder, Resolution	ppr	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096	4096
Circuit Loss	W	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Weight	kg	0.37	0.44	0.59	0.80	1.13	1.75	0.84	1.18	1.83	3.05	4.30	3.30	4.50
Connection Hardware Screw Size/Torque	Nm	0.63	0.63	0.63	3	3	3	3	3	3	5.2	5.2	5.2	5.2
Under-Voltage Trip, Nominal	VDC	Logic												
Over-Voltage Trip	VDC	Logic												

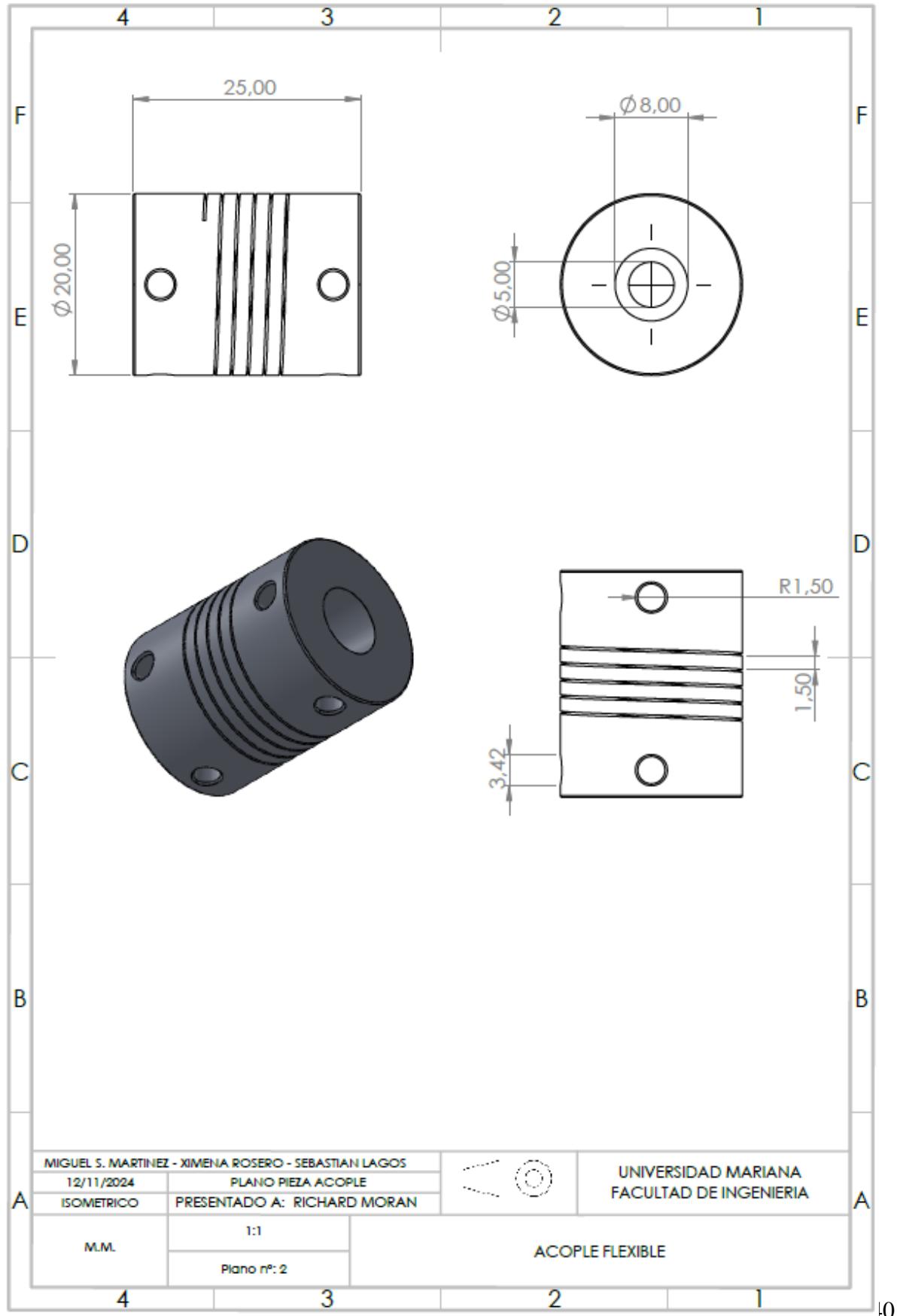


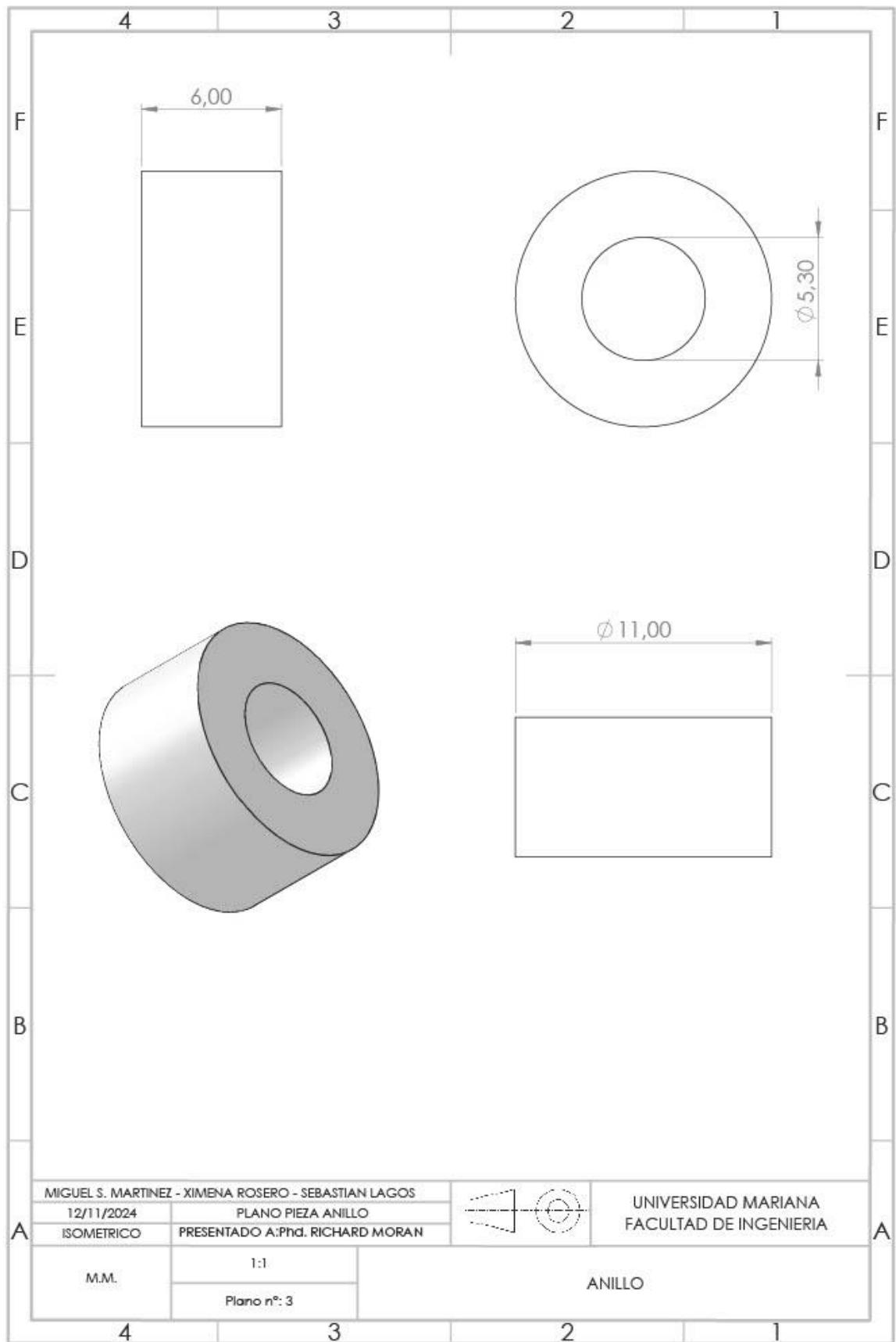
Anexo B . Matriz de selección final

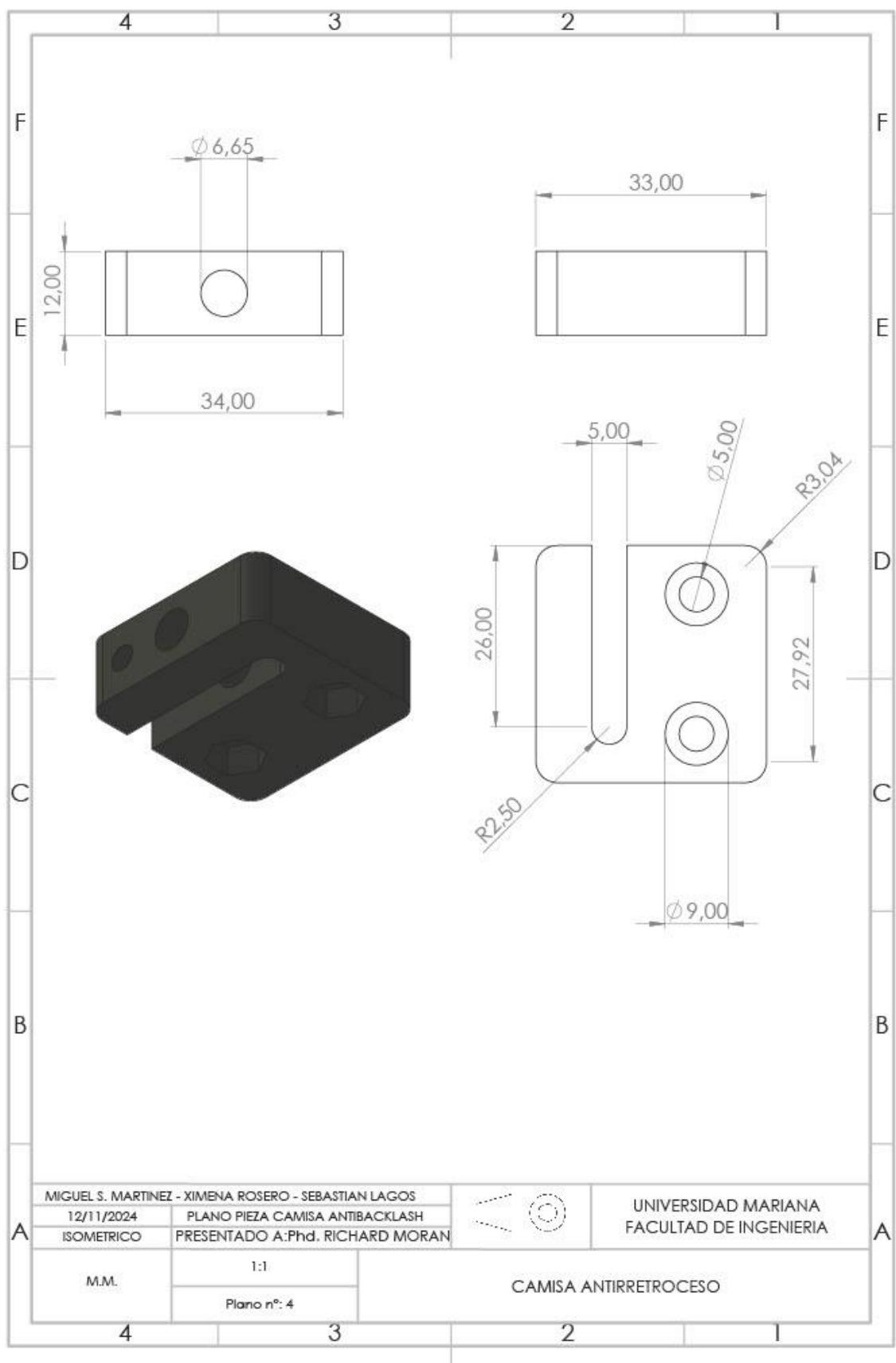
Criterios	Ponderación	Tornillo sin fin y		Correas dentadas		Acople y tornillo sin	
		corona		fin			
		Puntaje	Puntaje ponderado	Puntaje	Puntaje ponderado	Puntaje	Puntaje ponderado
Mantenimiento	26.7%	5	1.335	4	1.068	3	0.801
Peso	22.3%	5	1.115	1	0.223	4	0.892
Almacenamiento	14.2%	5	0.71	5	0.71	1	0.142
Durabilidad	12.8%	5	0.64	3	0.384	3	0.384
Disponibilidad	10.8%	4	0.432	4	0.432	2	0.216
Facilidad de llenado	8.0%	4	0.32	4	0.32	3	0.24
Costo	5.2%	1	0.052	3	0.156	4	0.208
Puntaje total		4.604		3.293		2.883	
Clasificación		1		2		3	

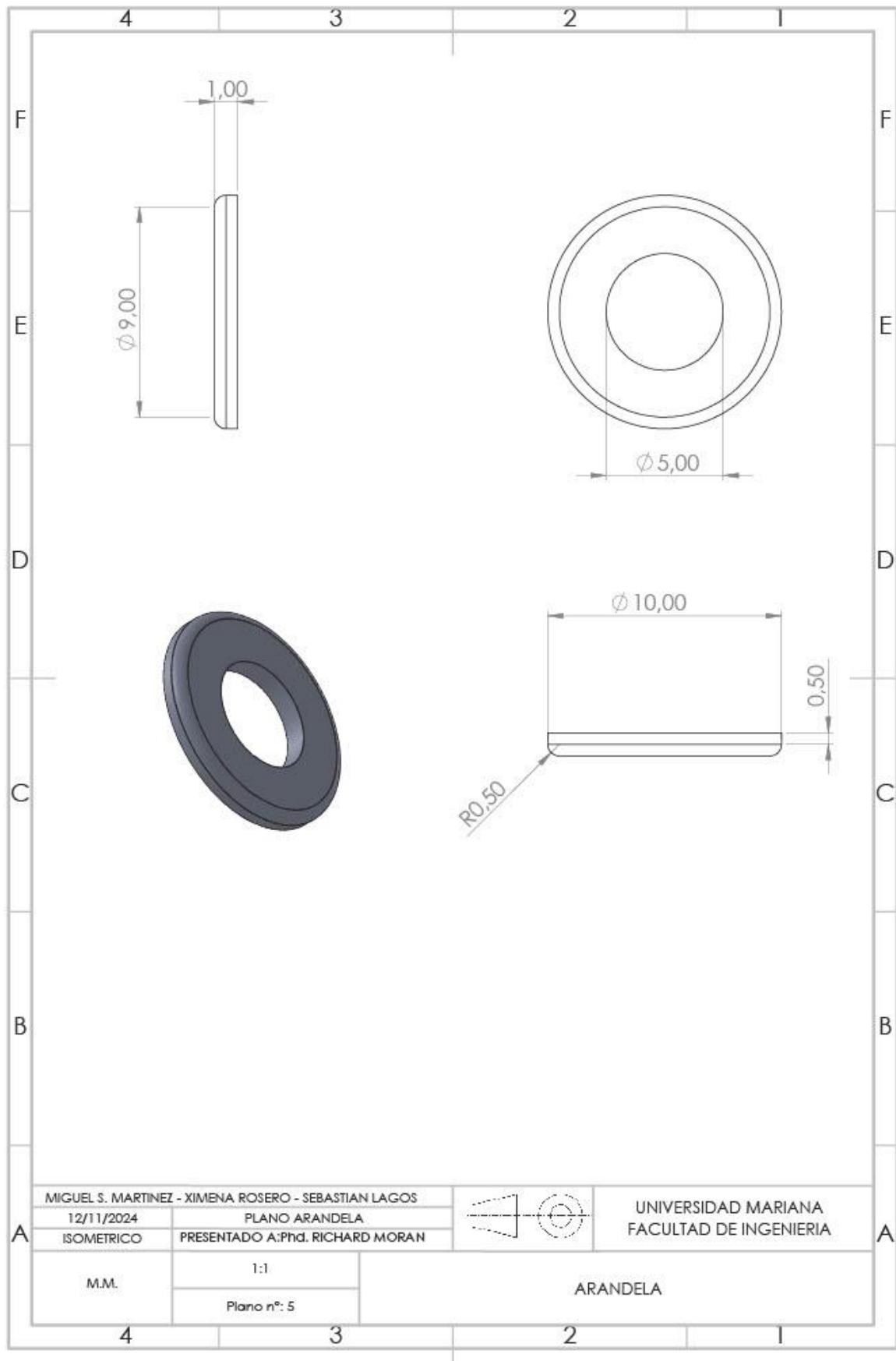
Anexo C . Planos de piezas, sub-ensamblajes y ensamblajes

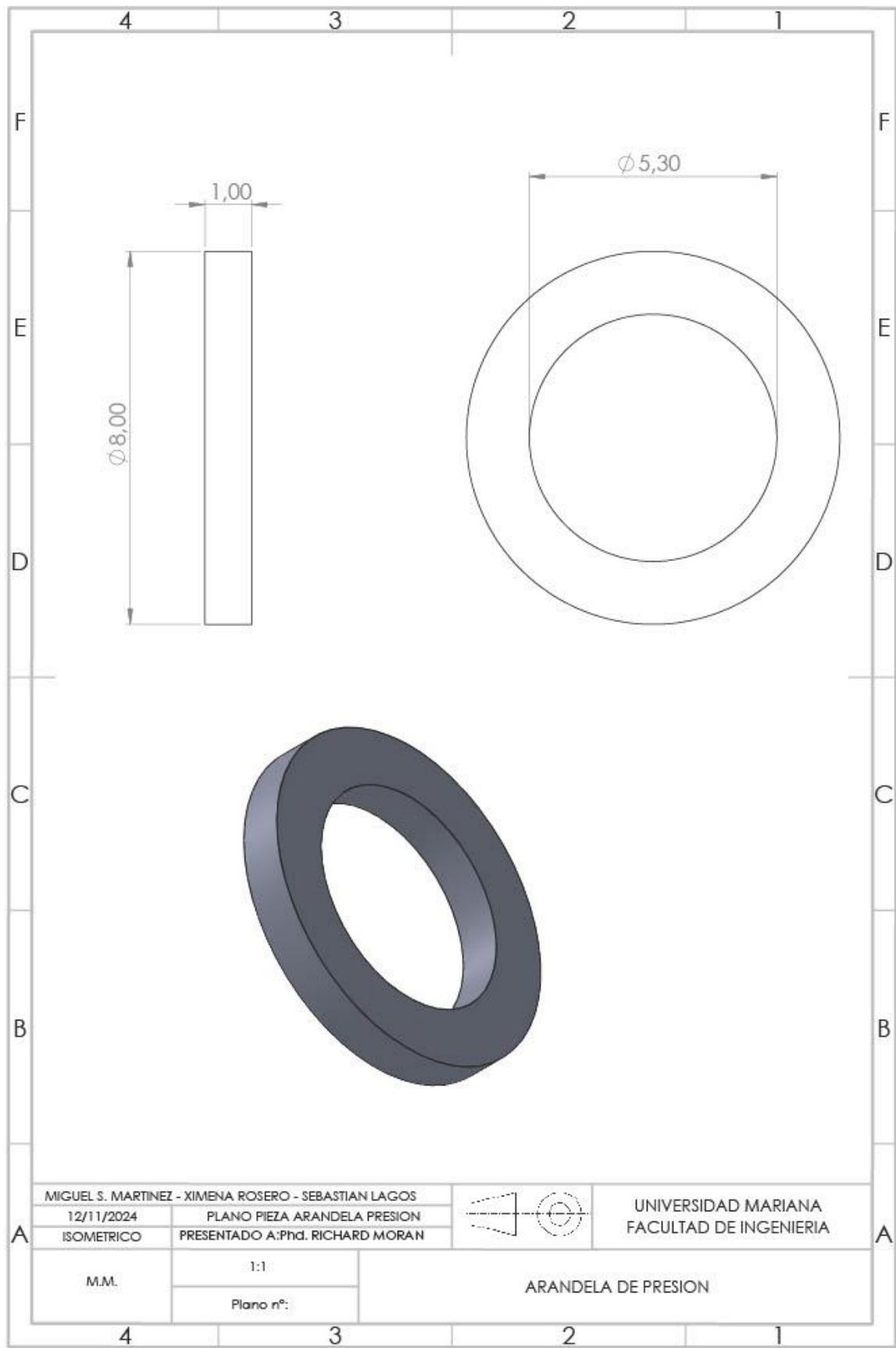


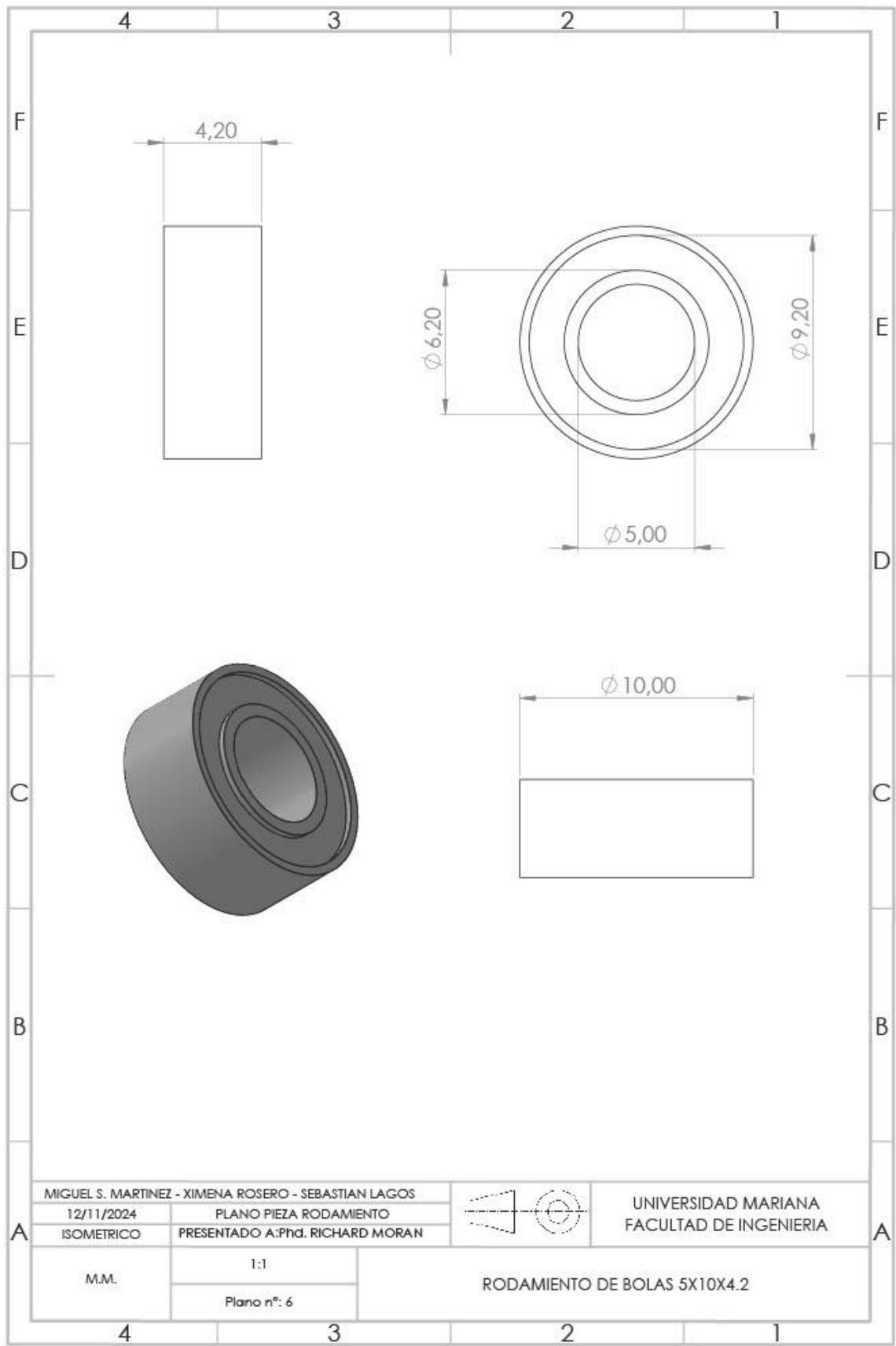


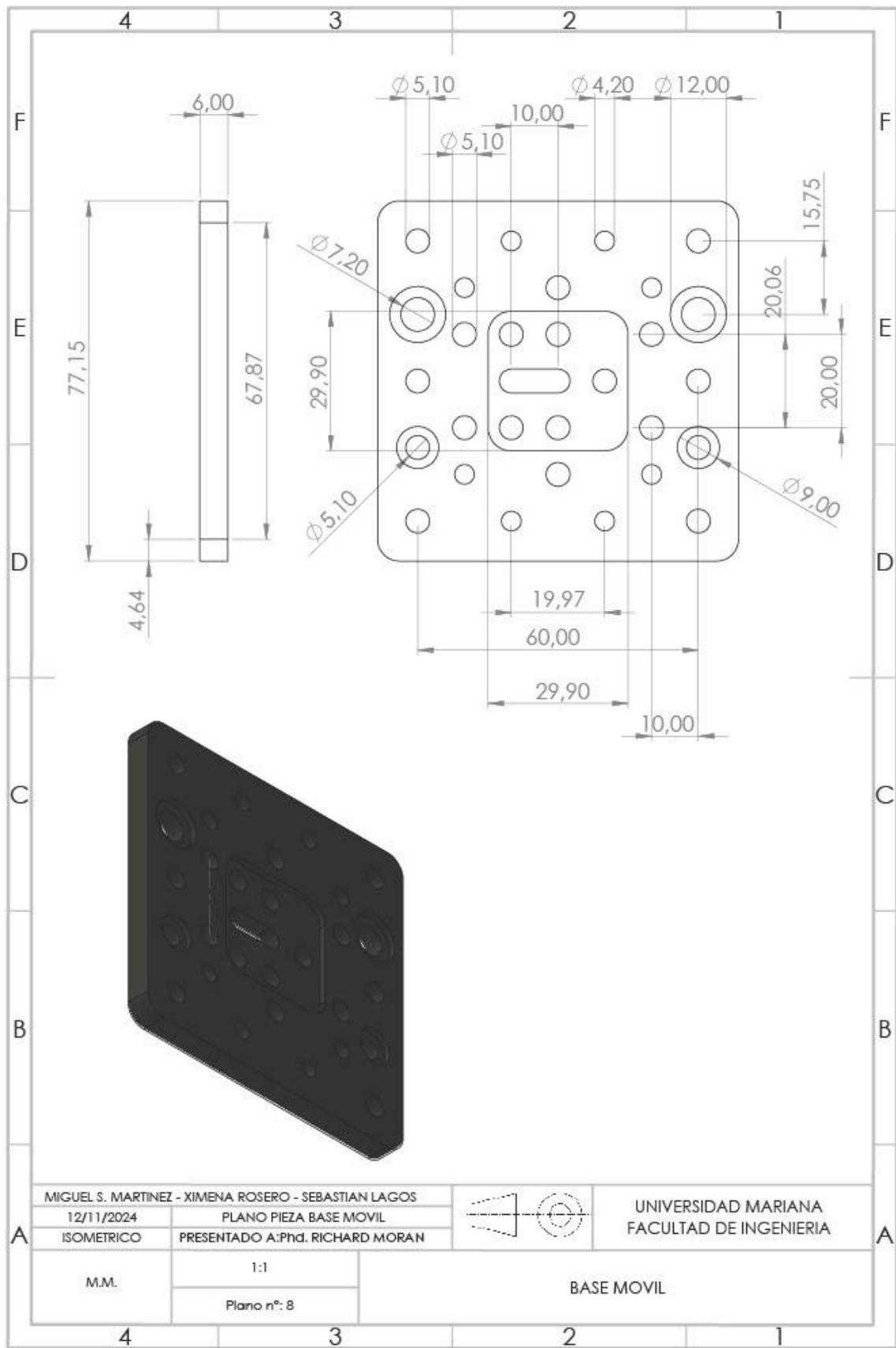


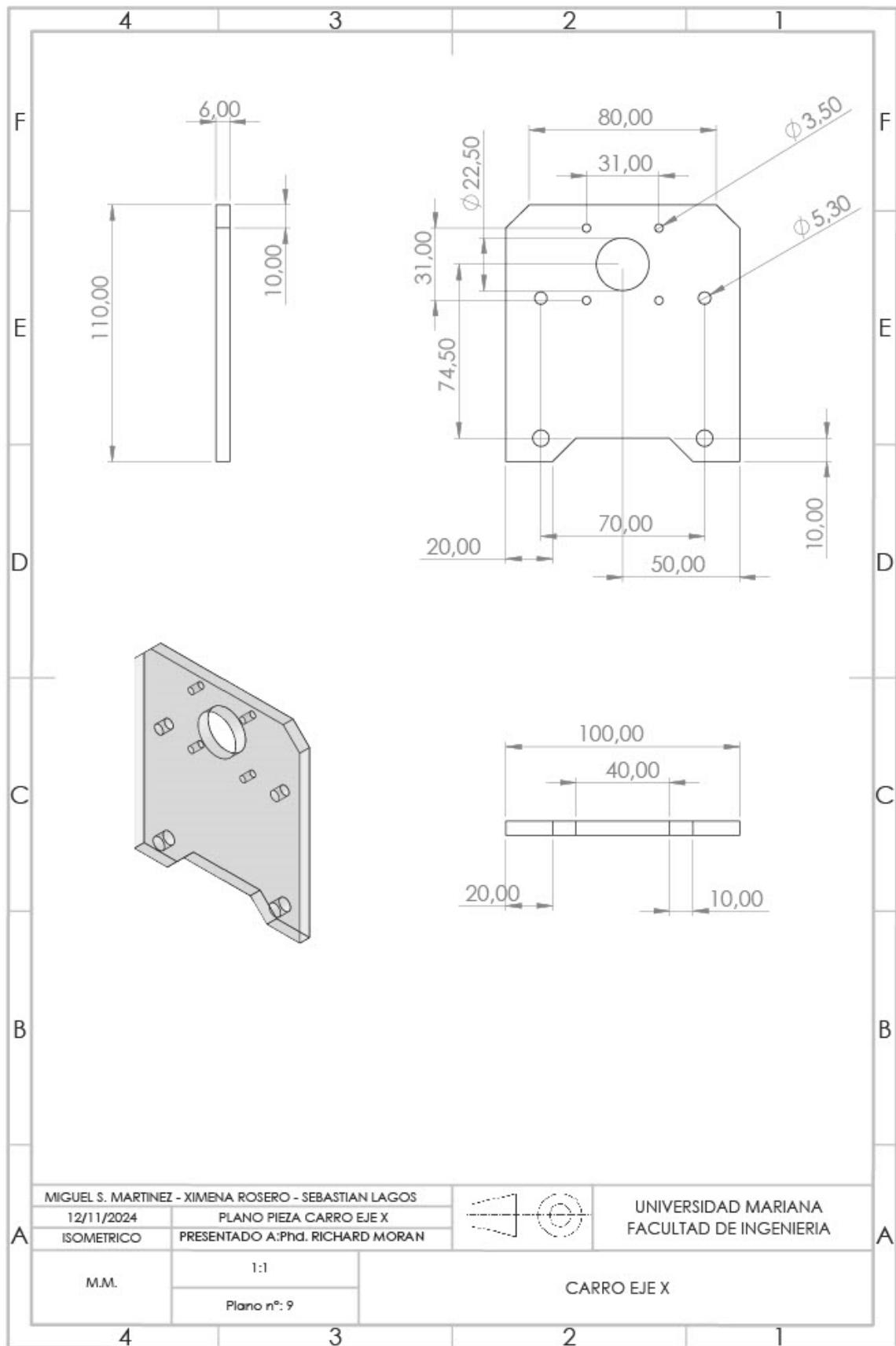


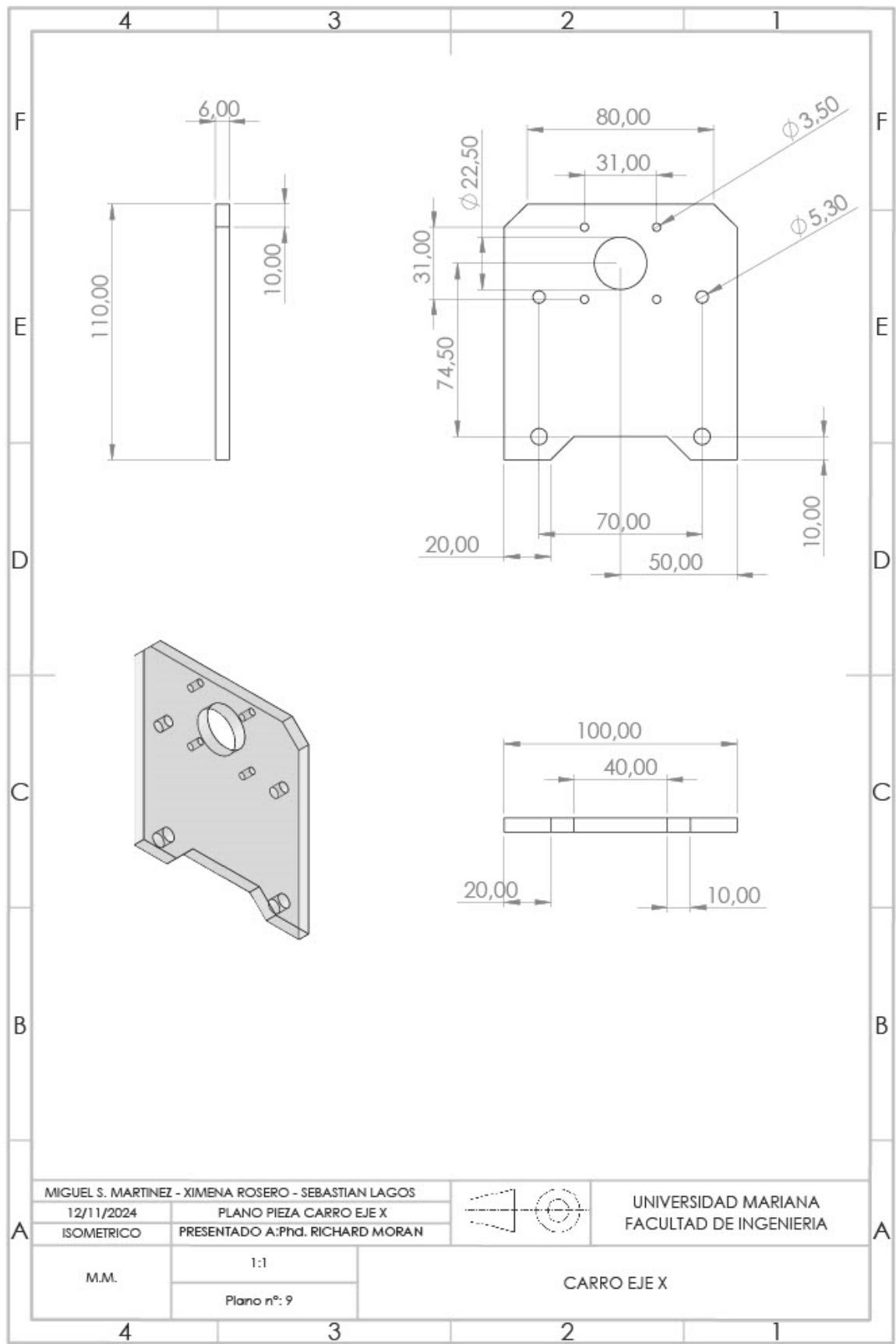


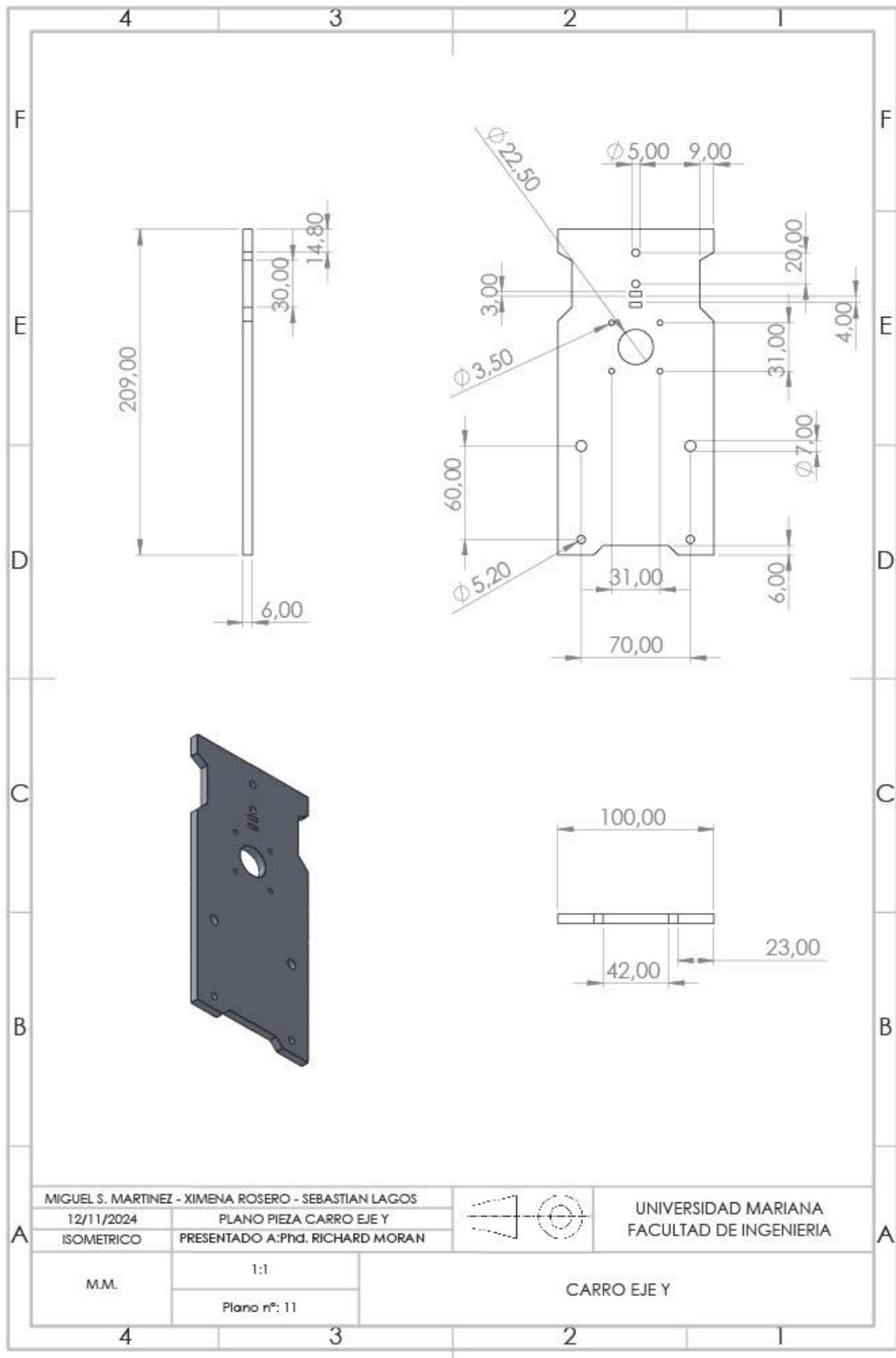


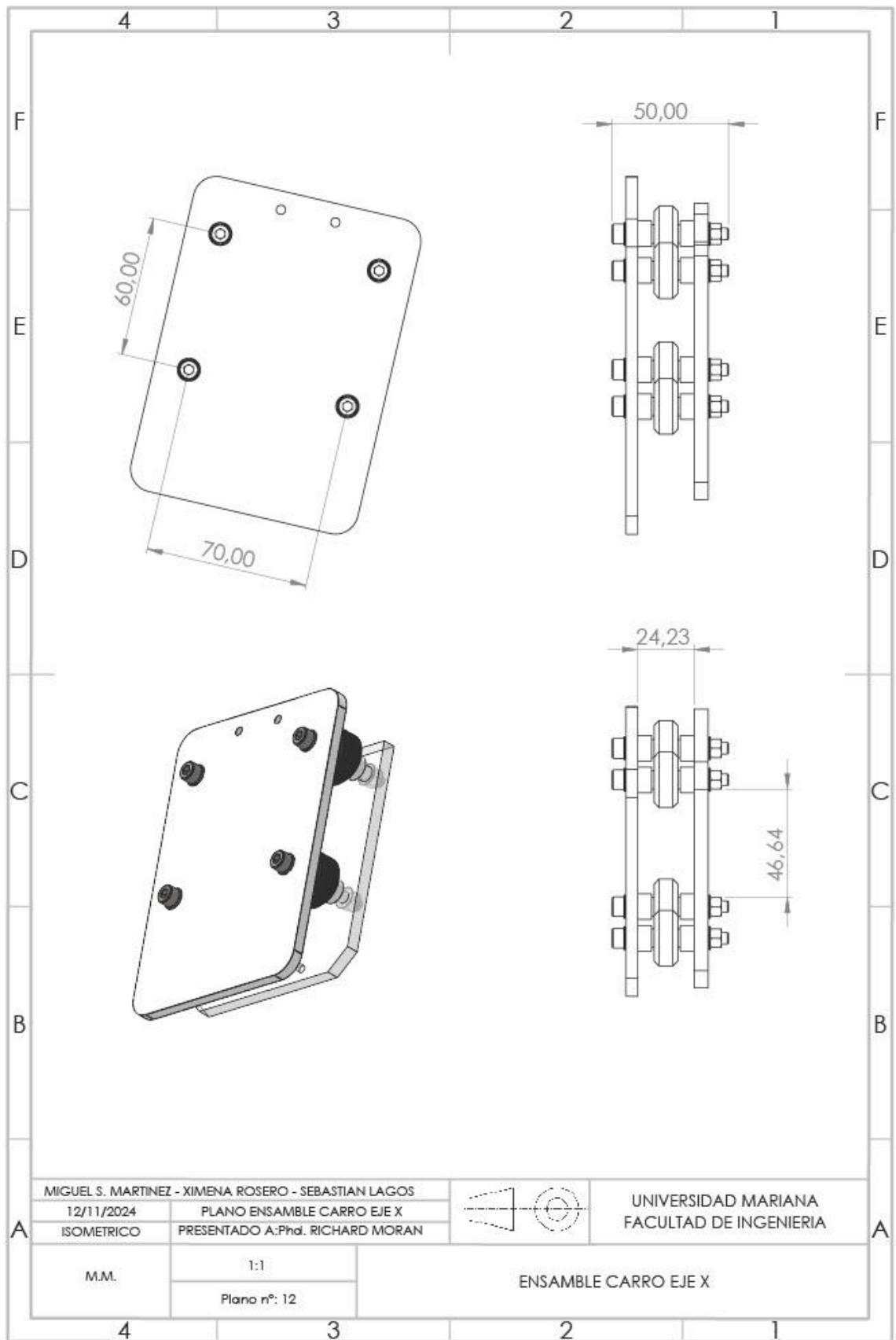


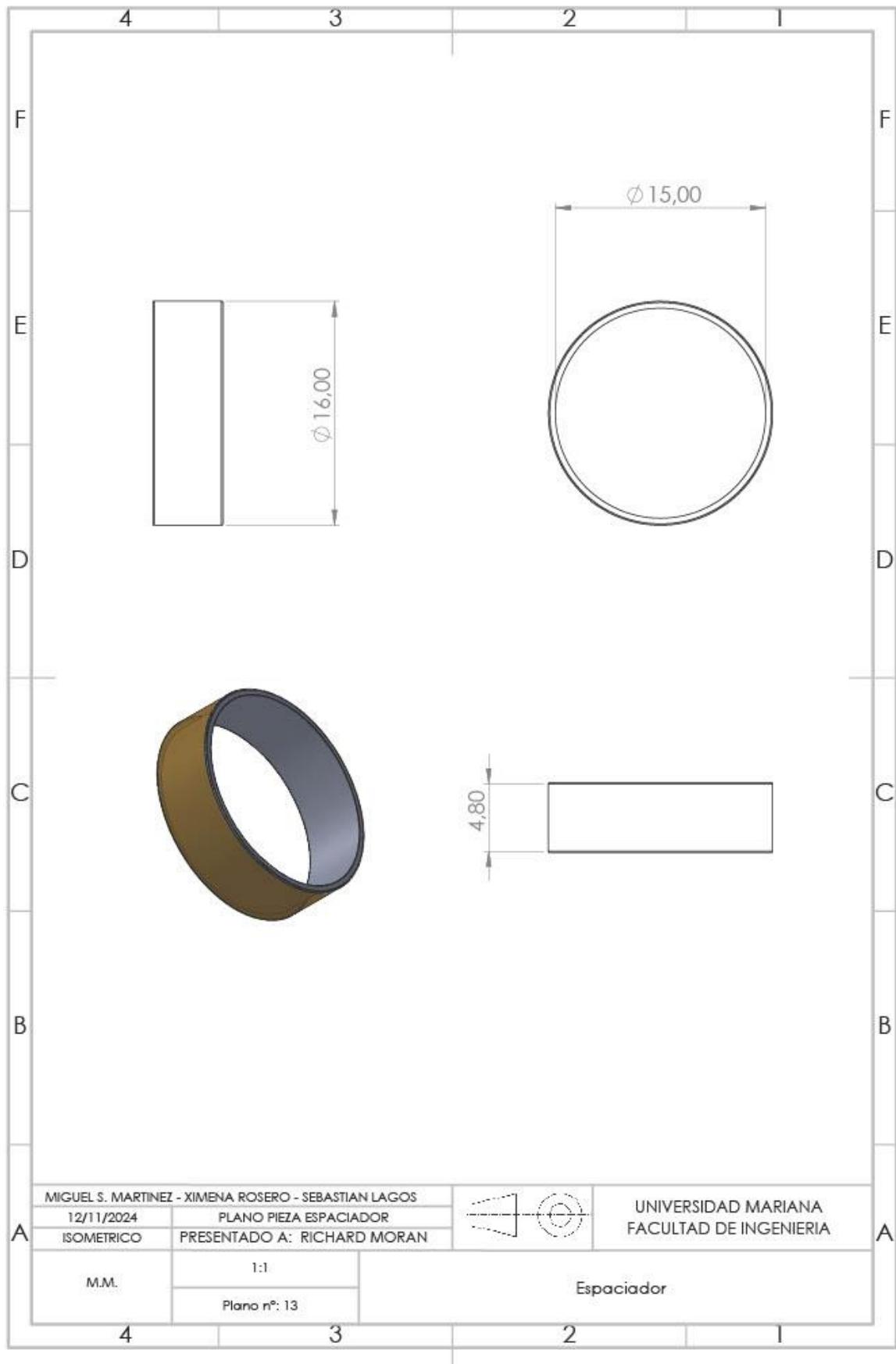


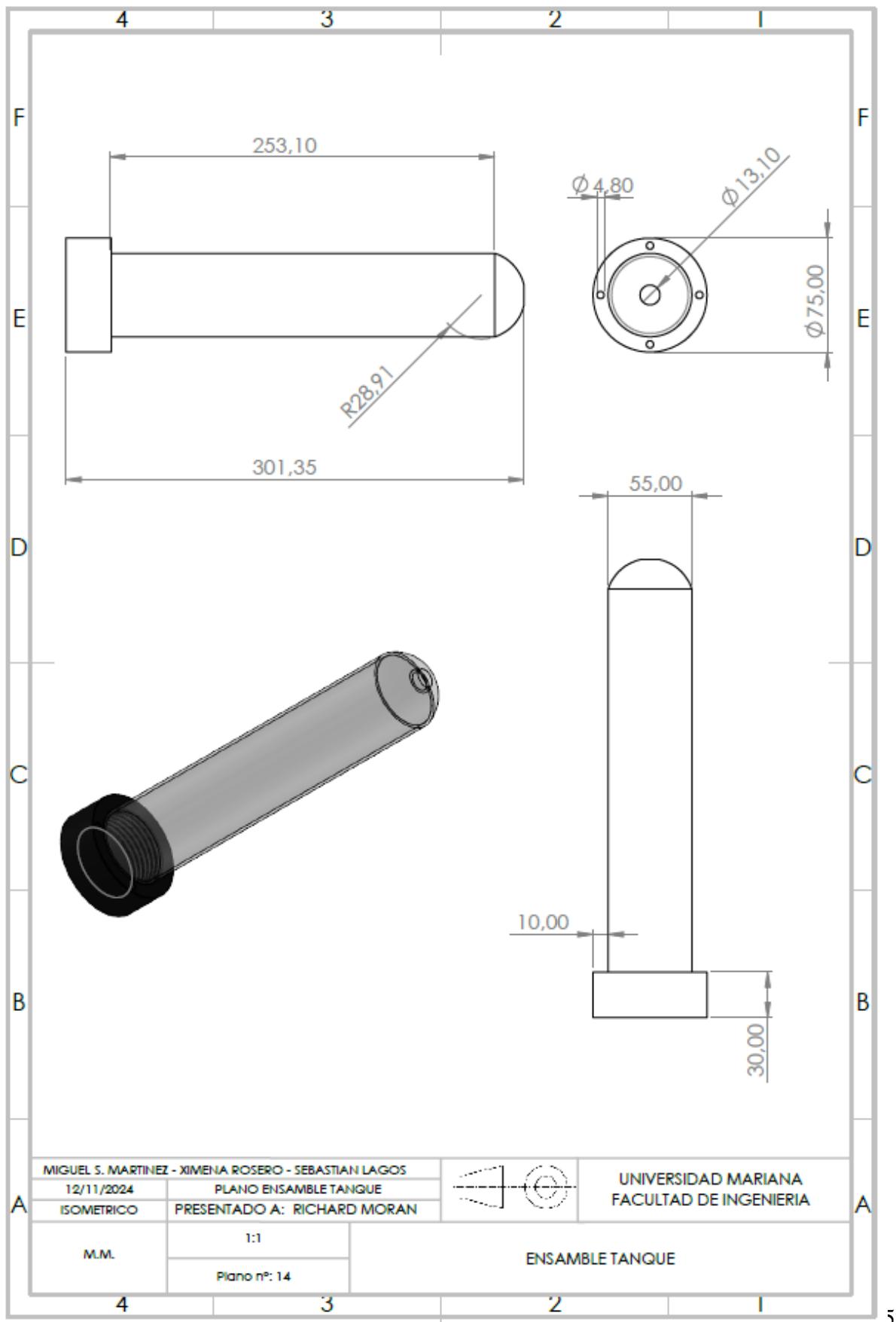


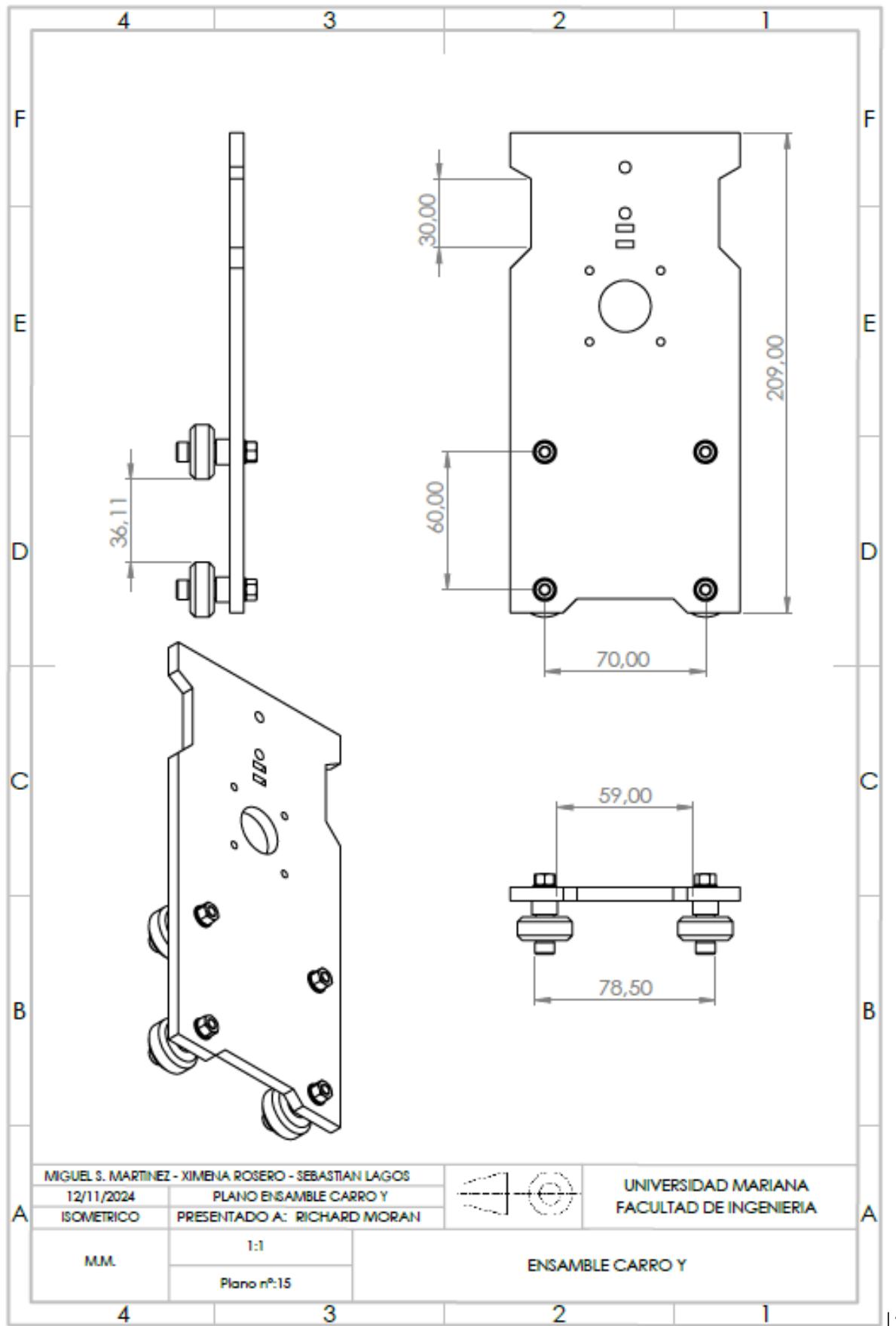


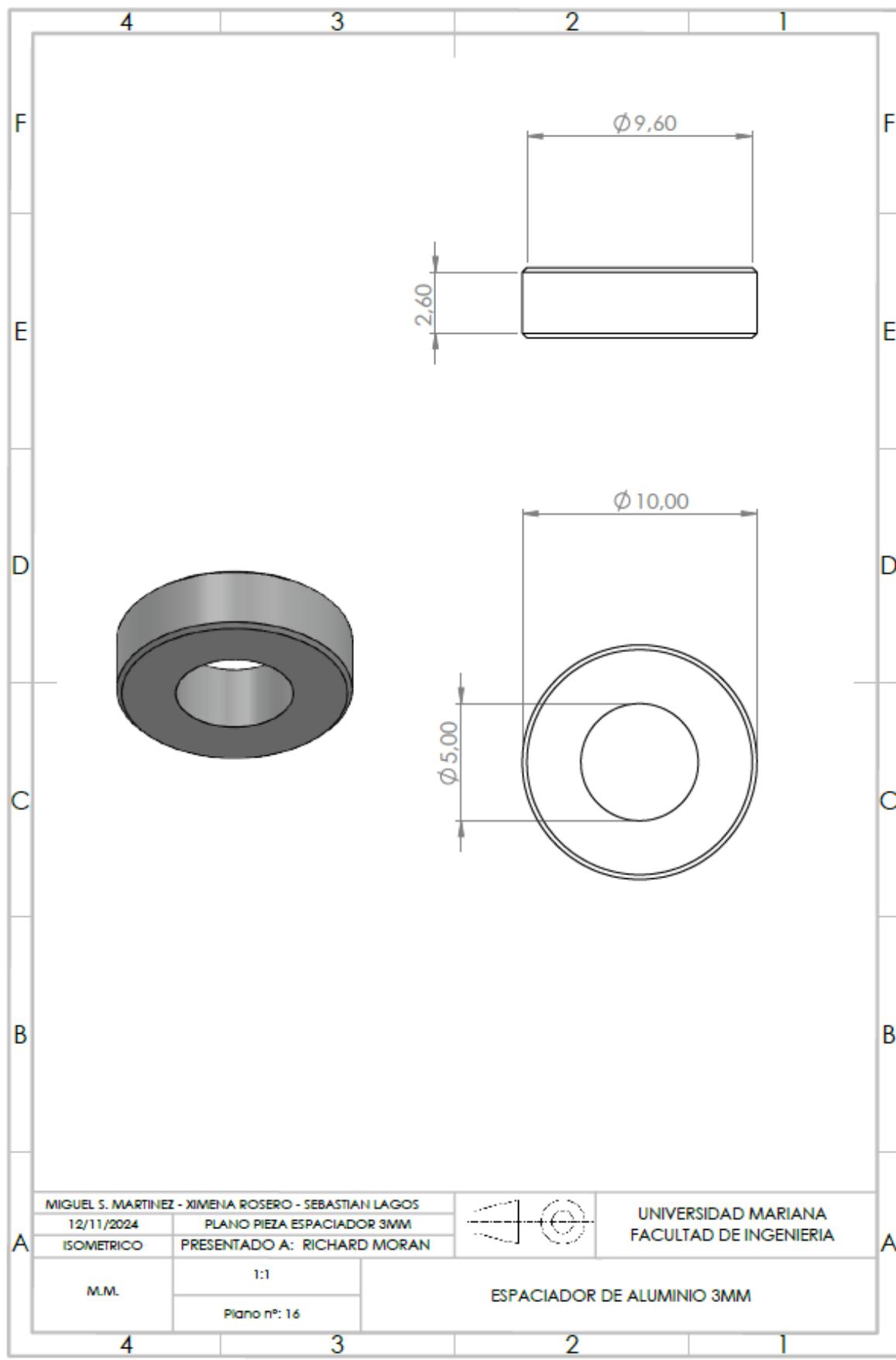


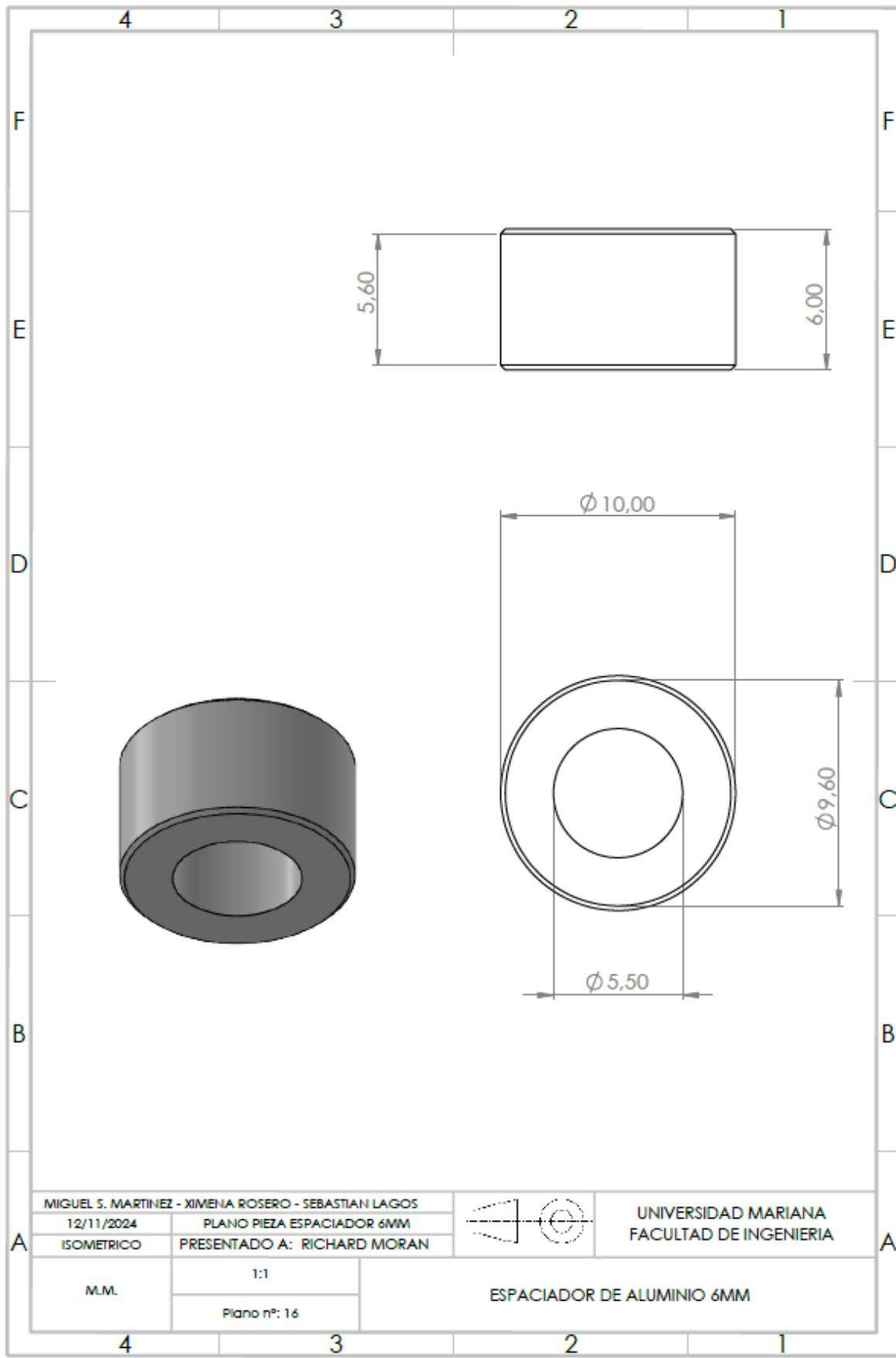


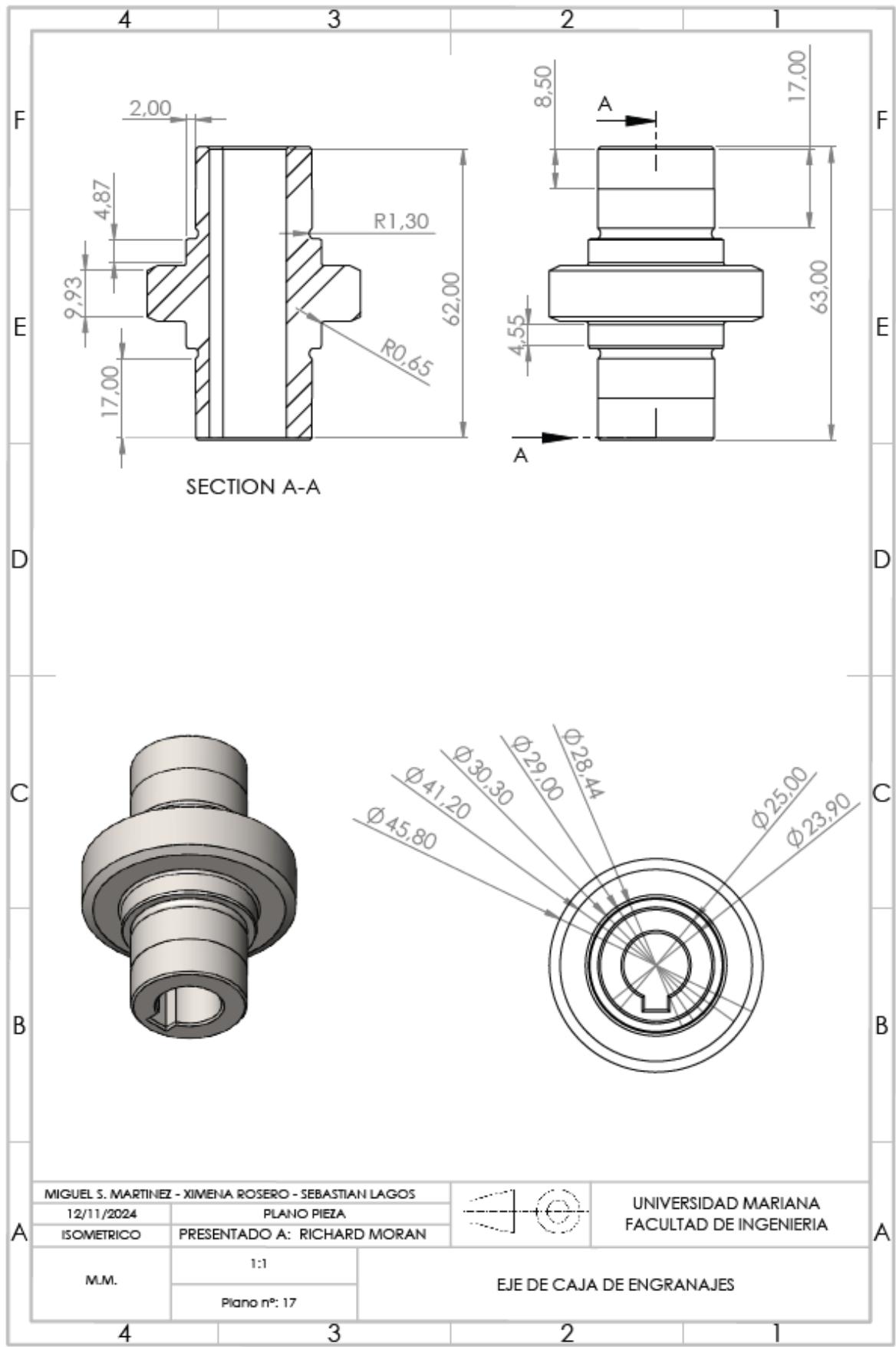




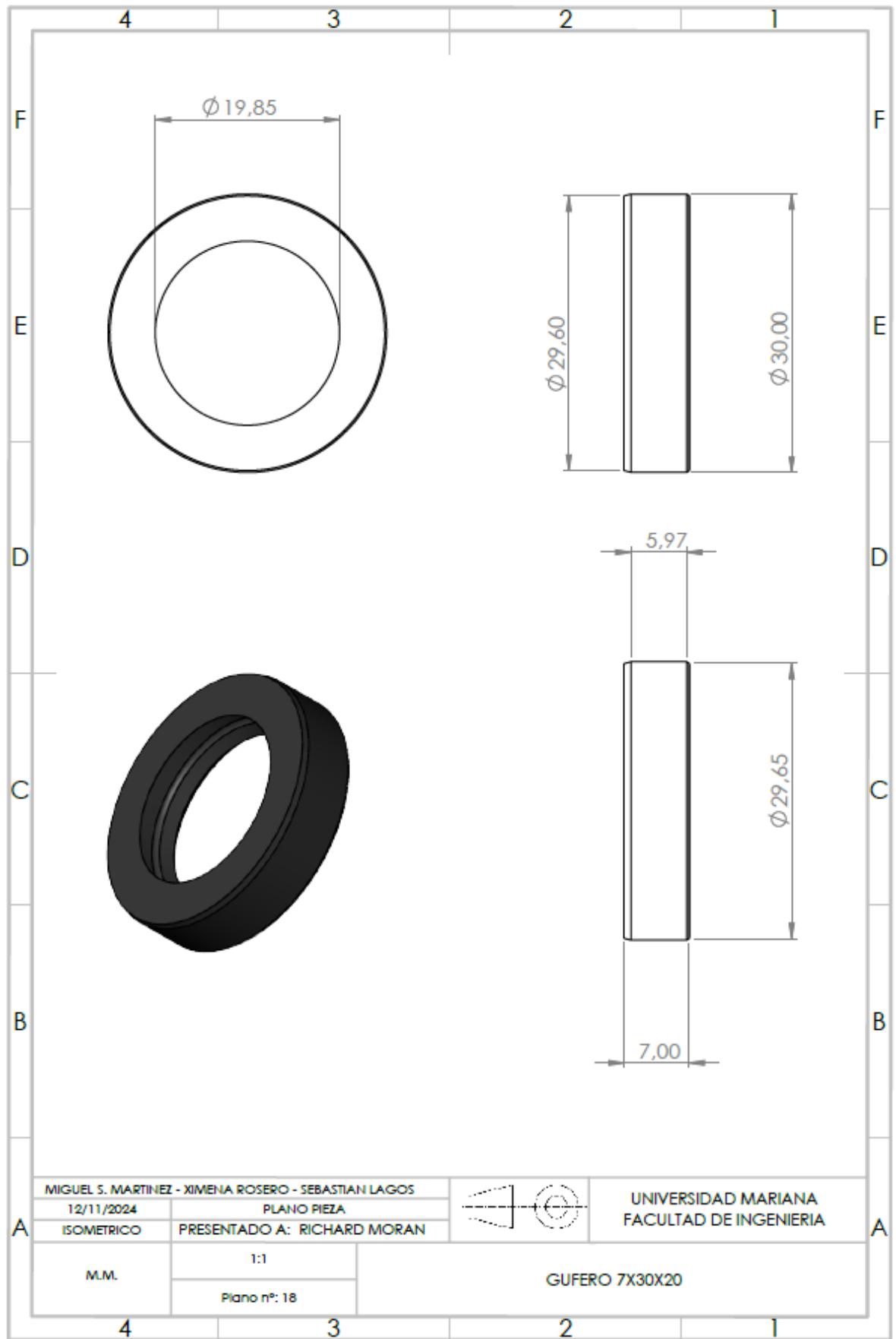


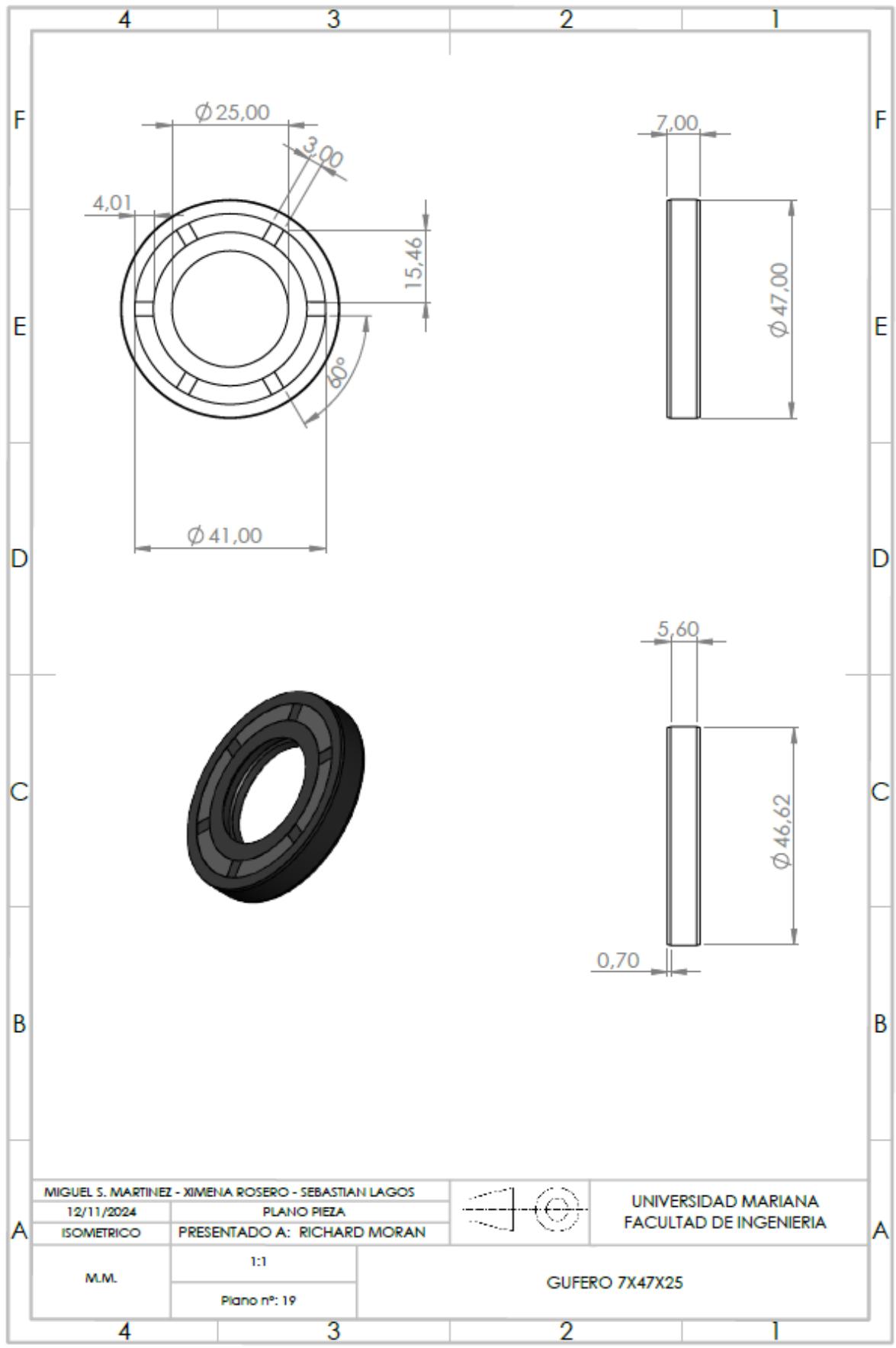


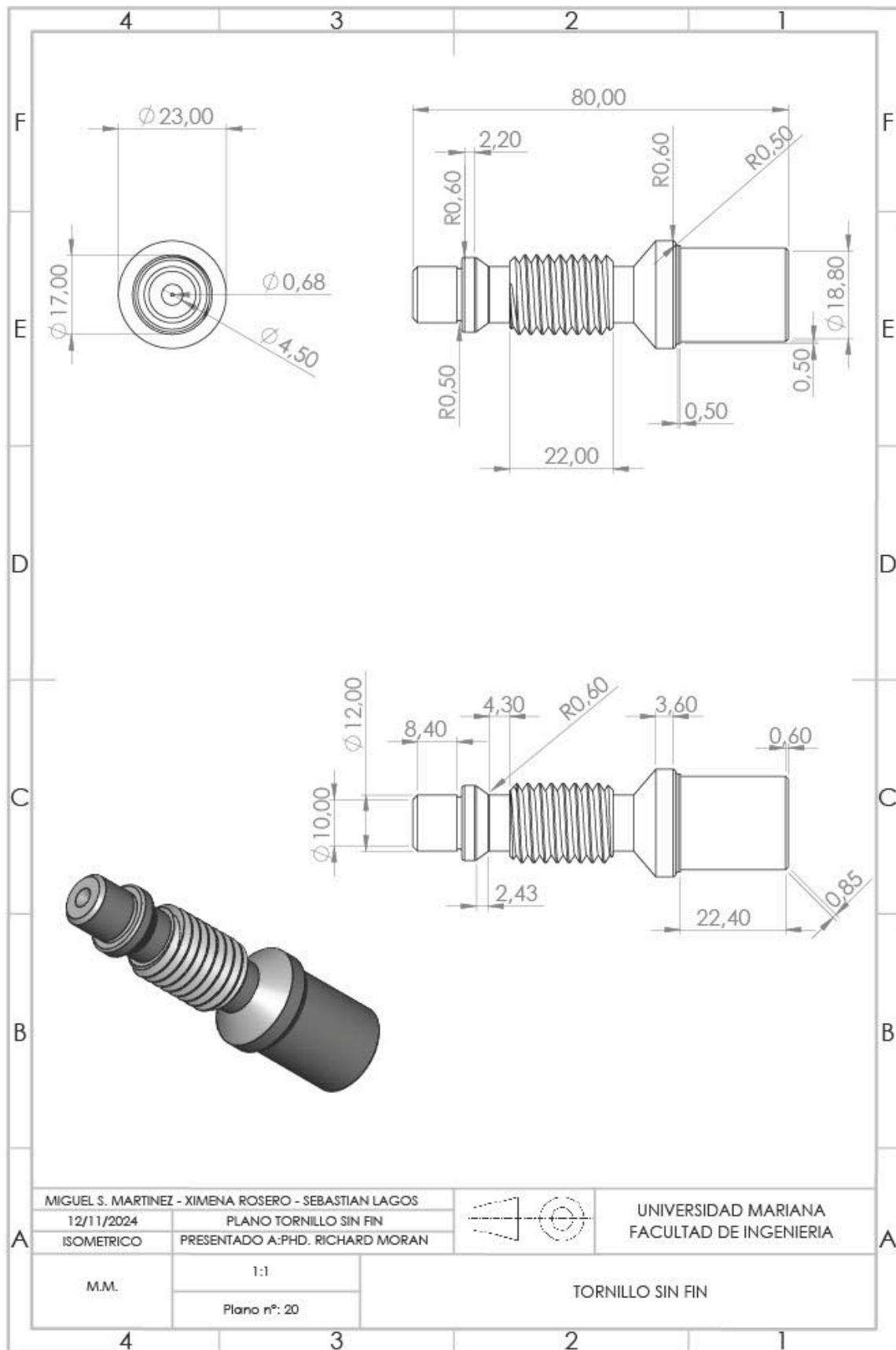


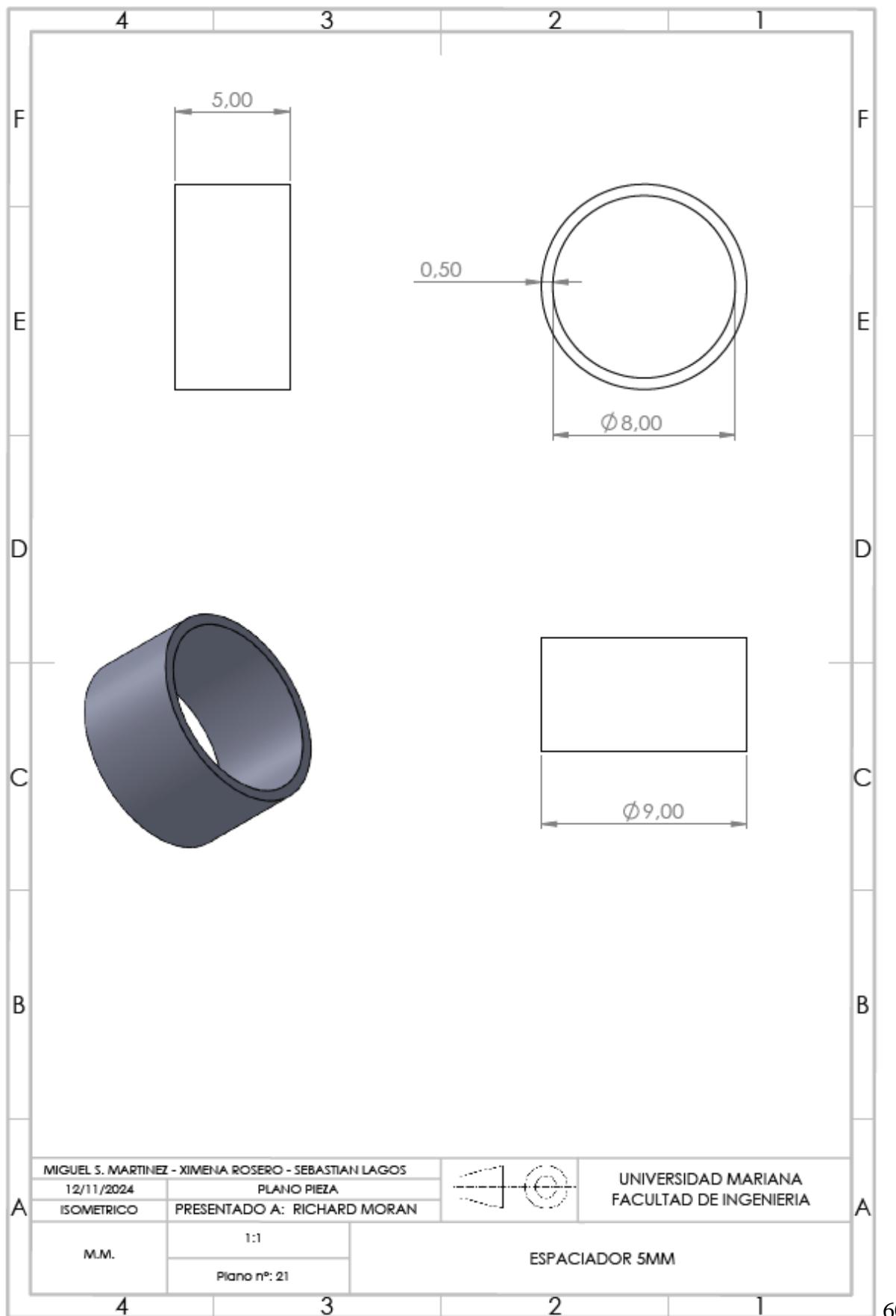


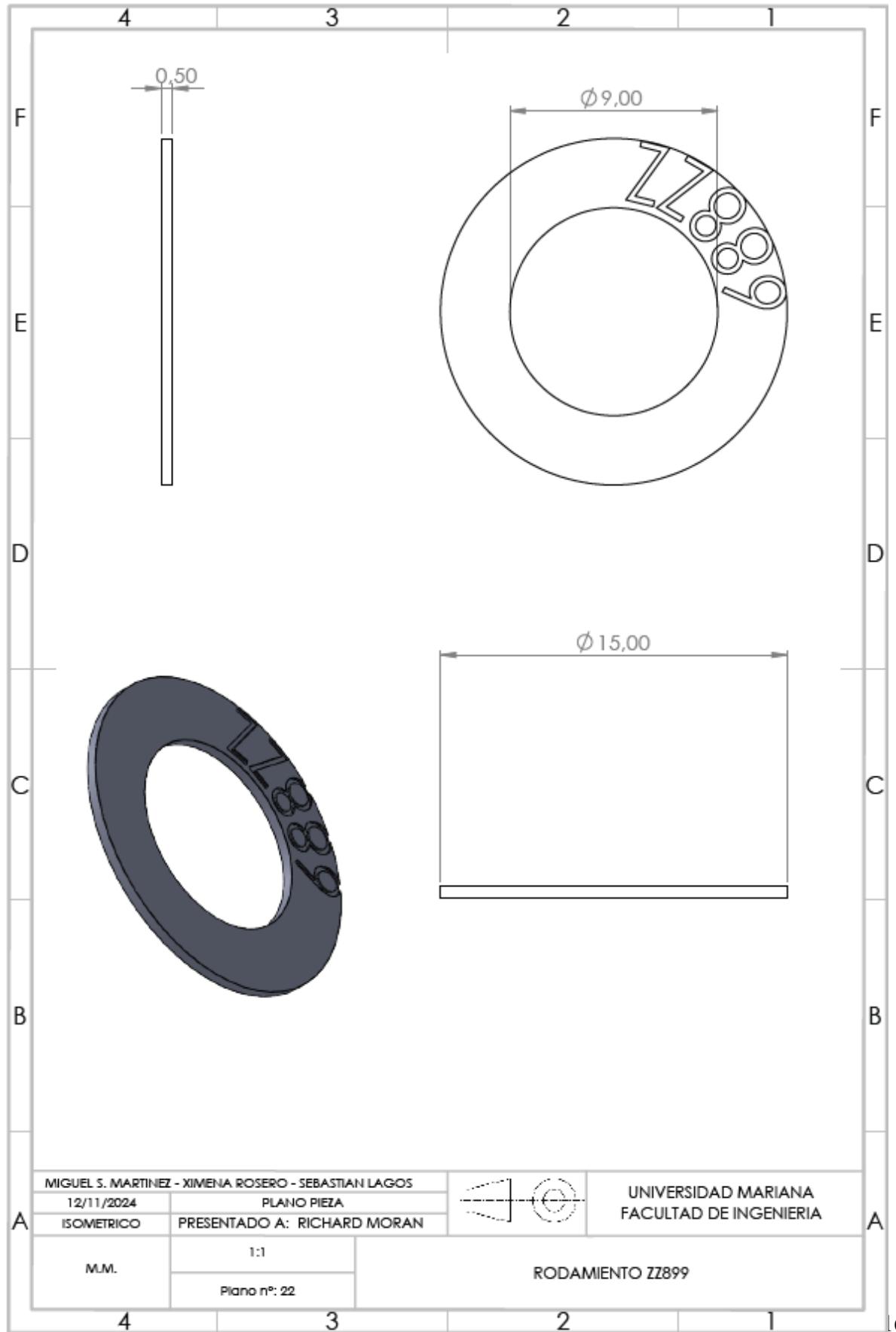
MIGUEL S. MARTINEZ - XIMENA ROSERO - SEBASTIAN LAGOS			UNIVERSIDAD MARIANA FACULTAD DE INGENIERIA
12/11/2024	PLANO PIEZA		
ISOMETRICO	PRESENTADO A: RICHARD MORAN		
M.M.	1:1		EJE DE CAJA DE ENGRANAJES
	Plano n°: 17		

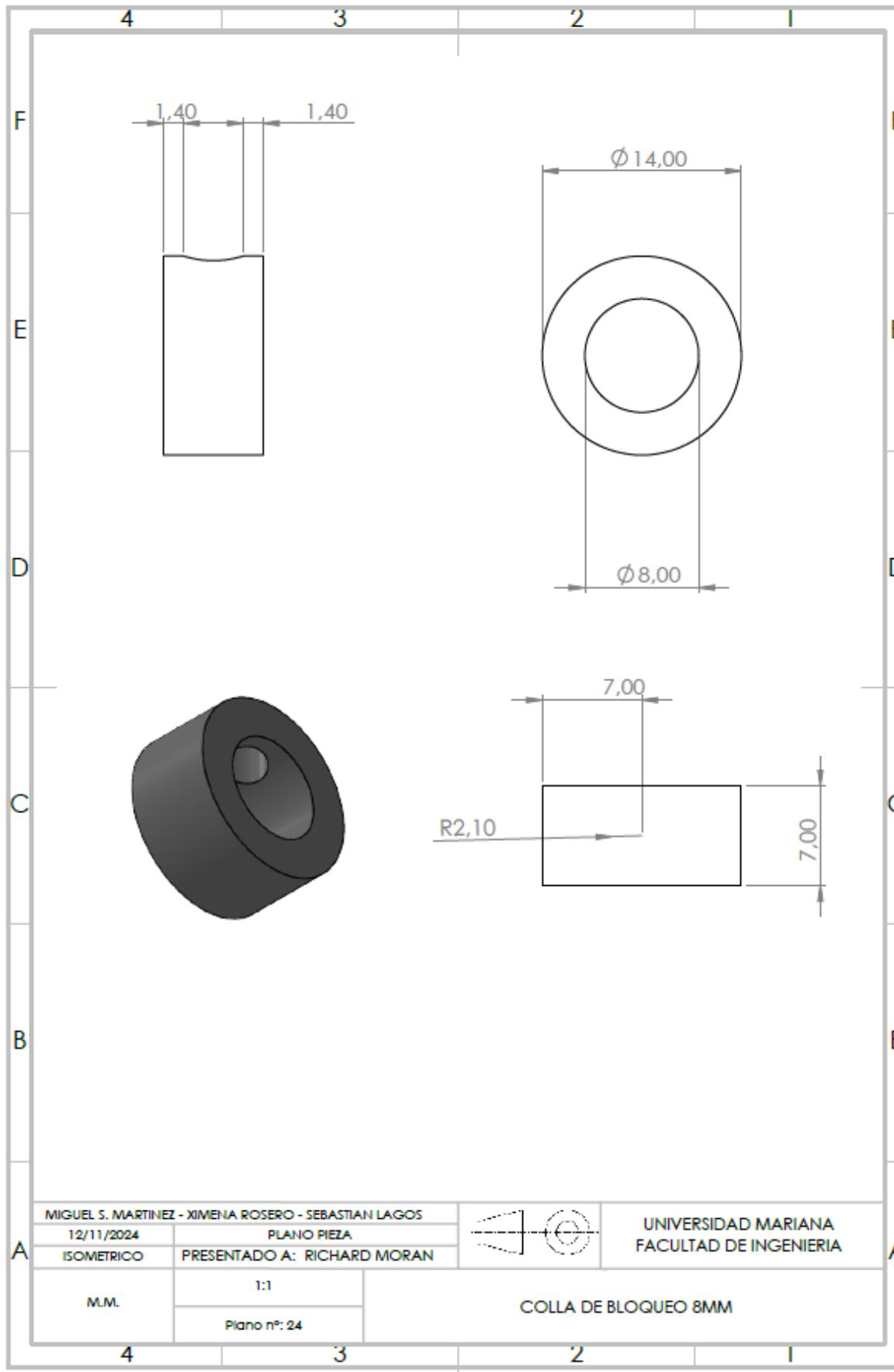


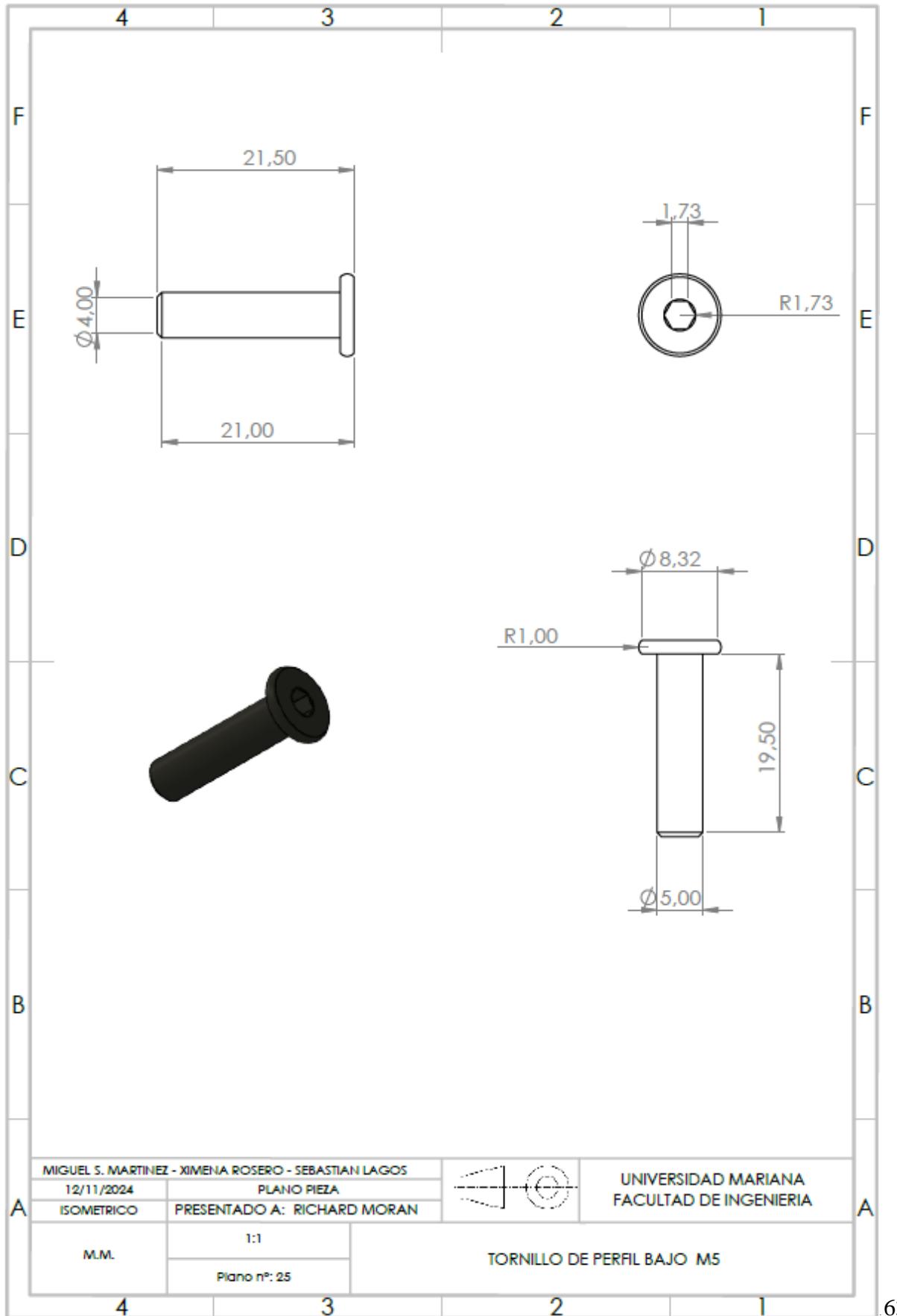


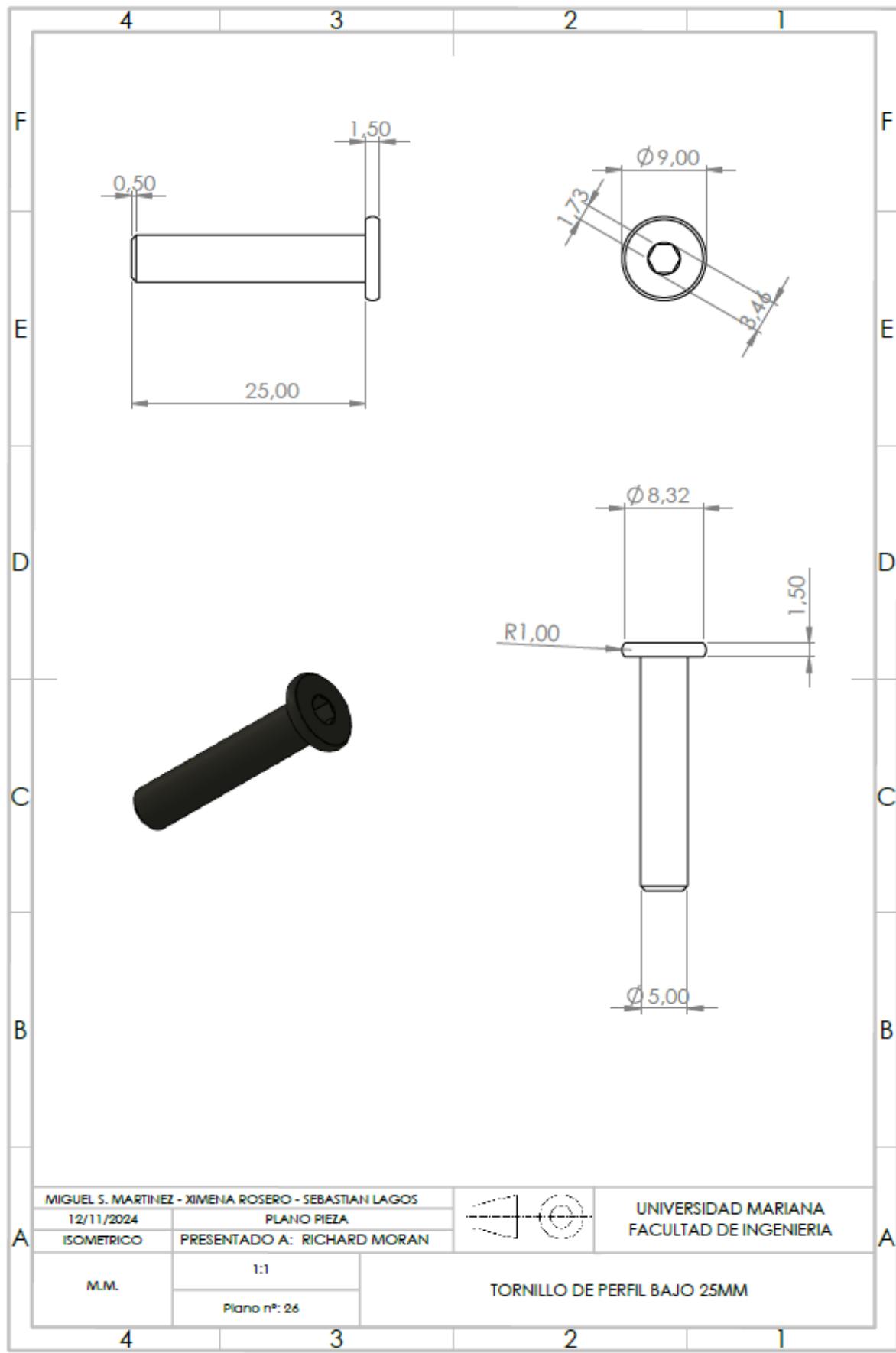


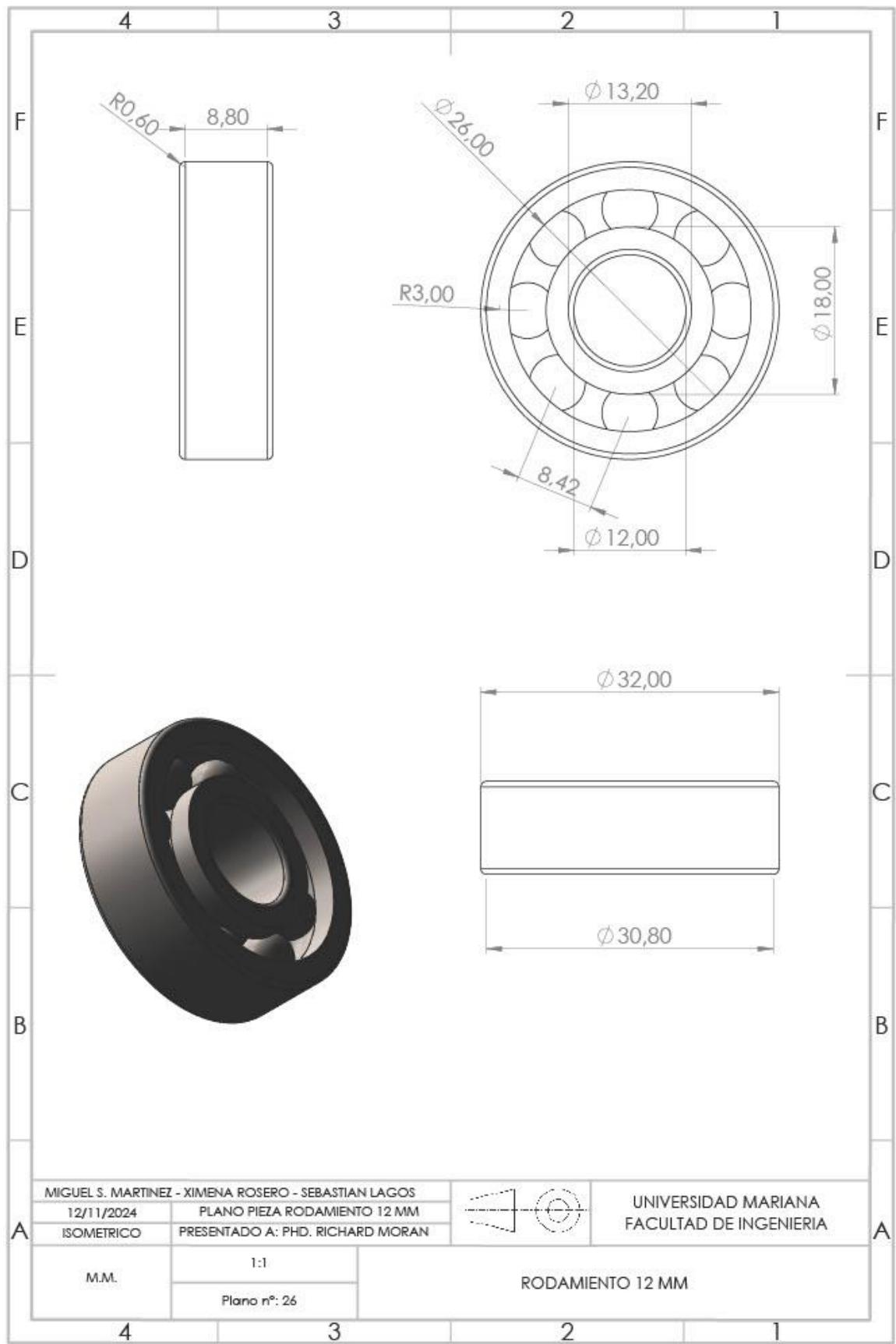


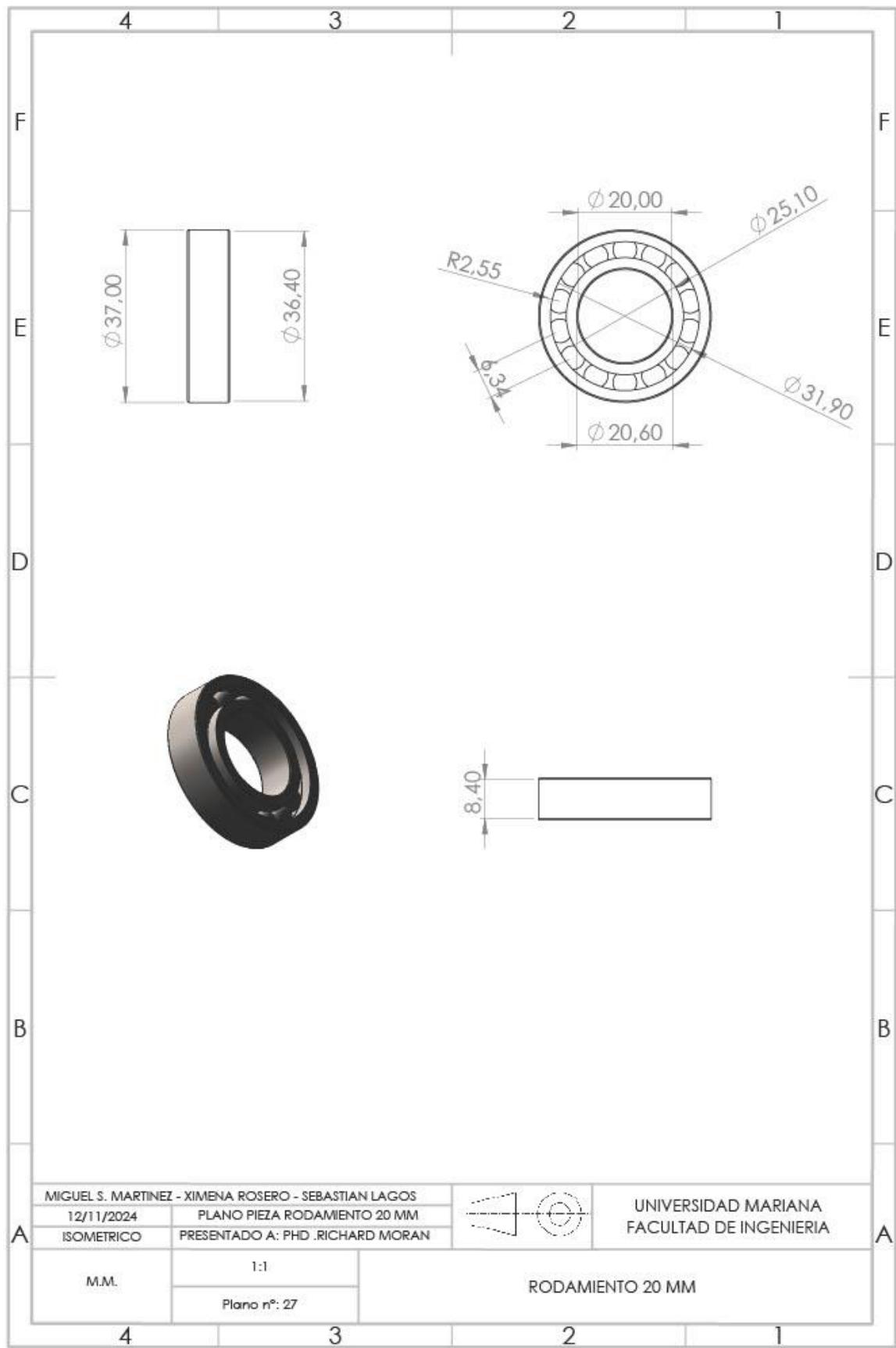


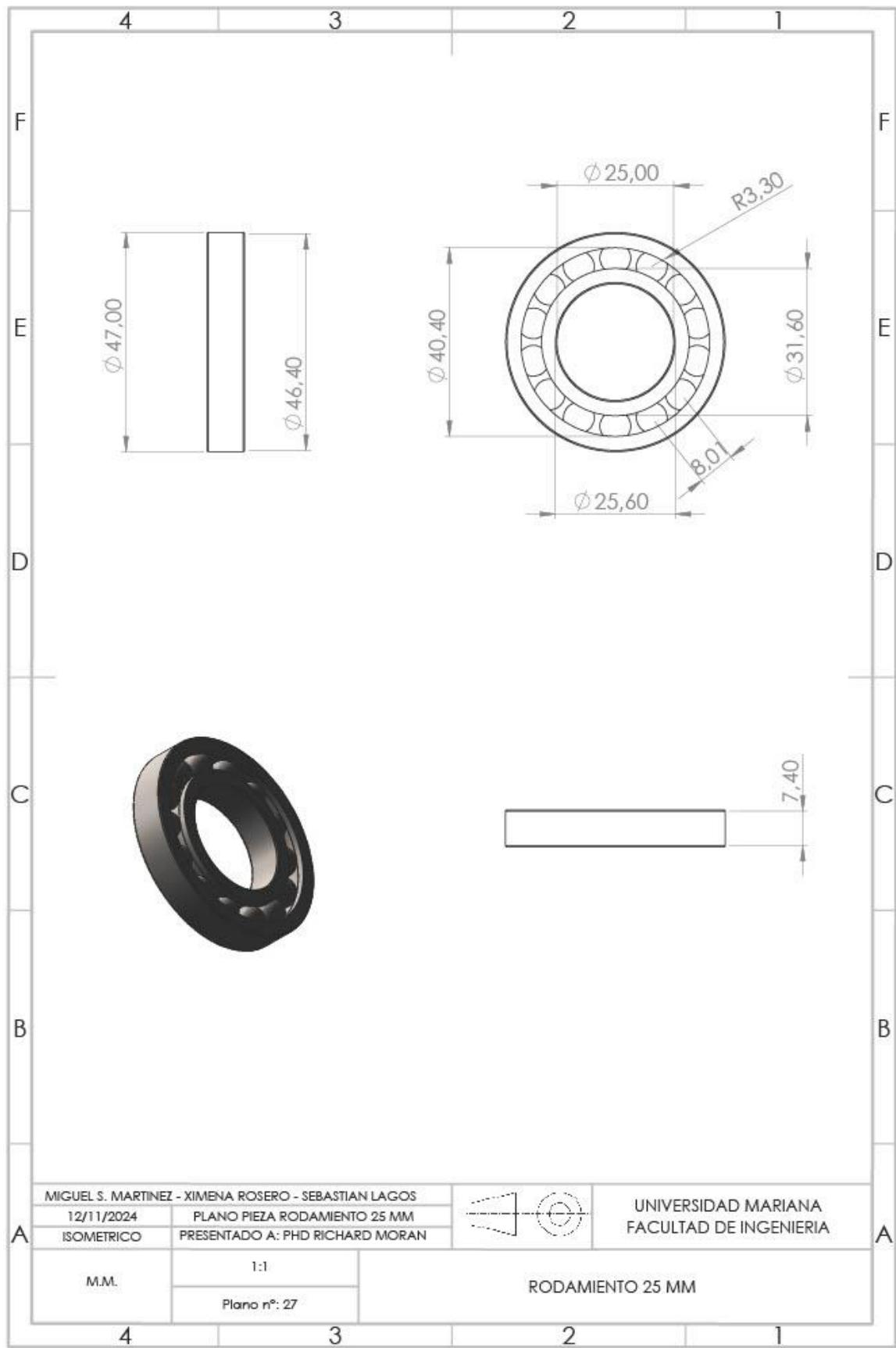


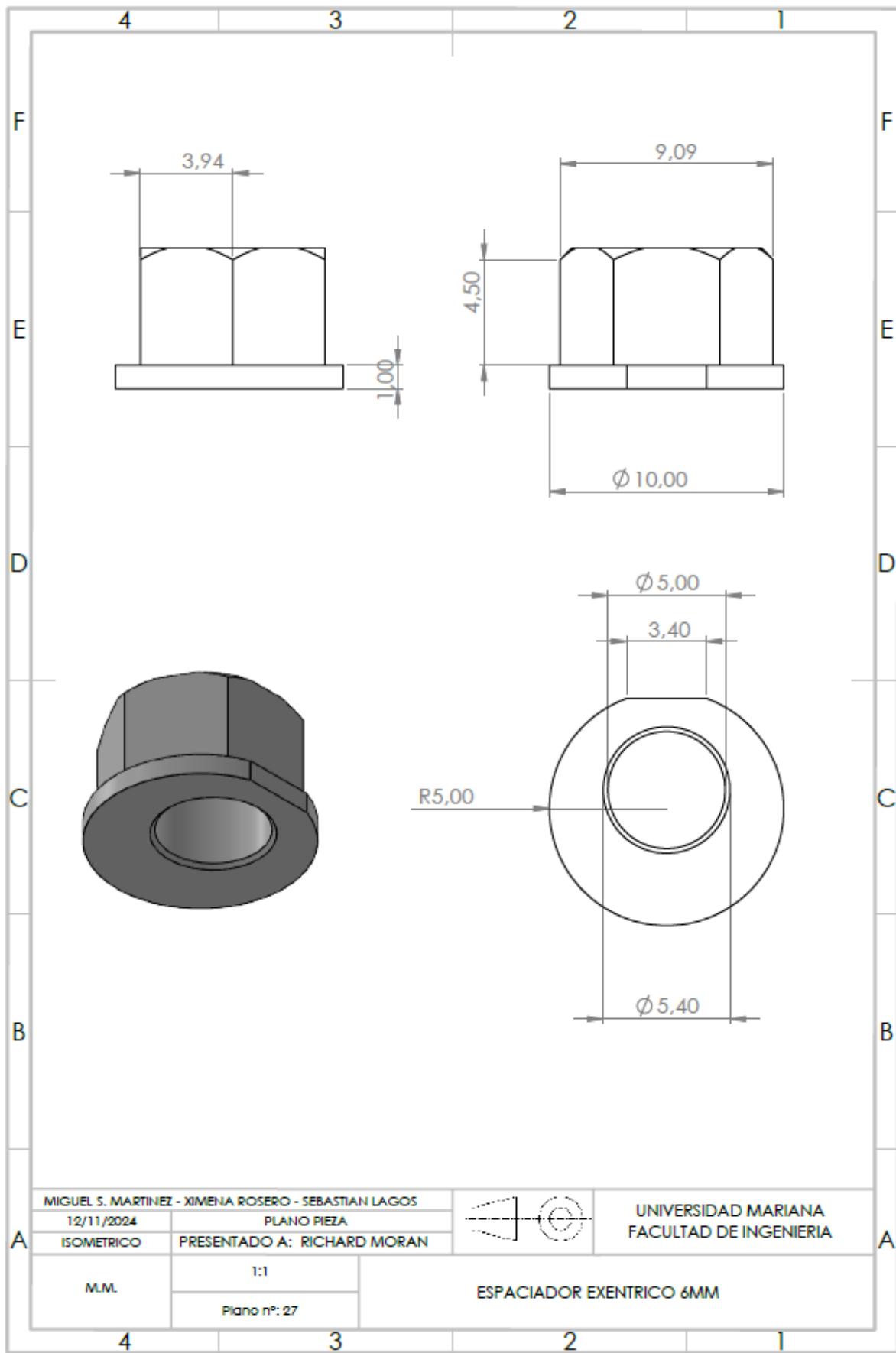


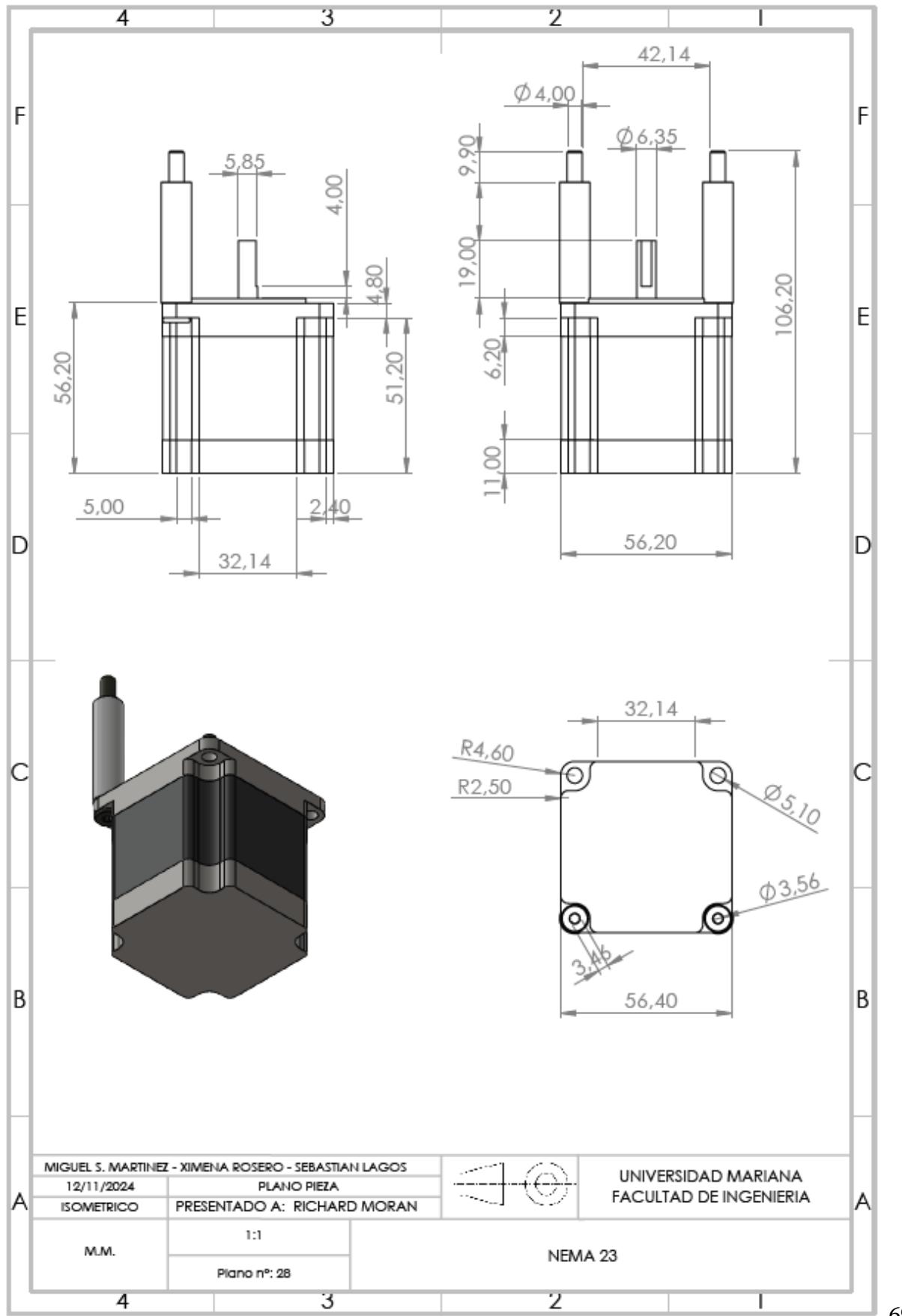


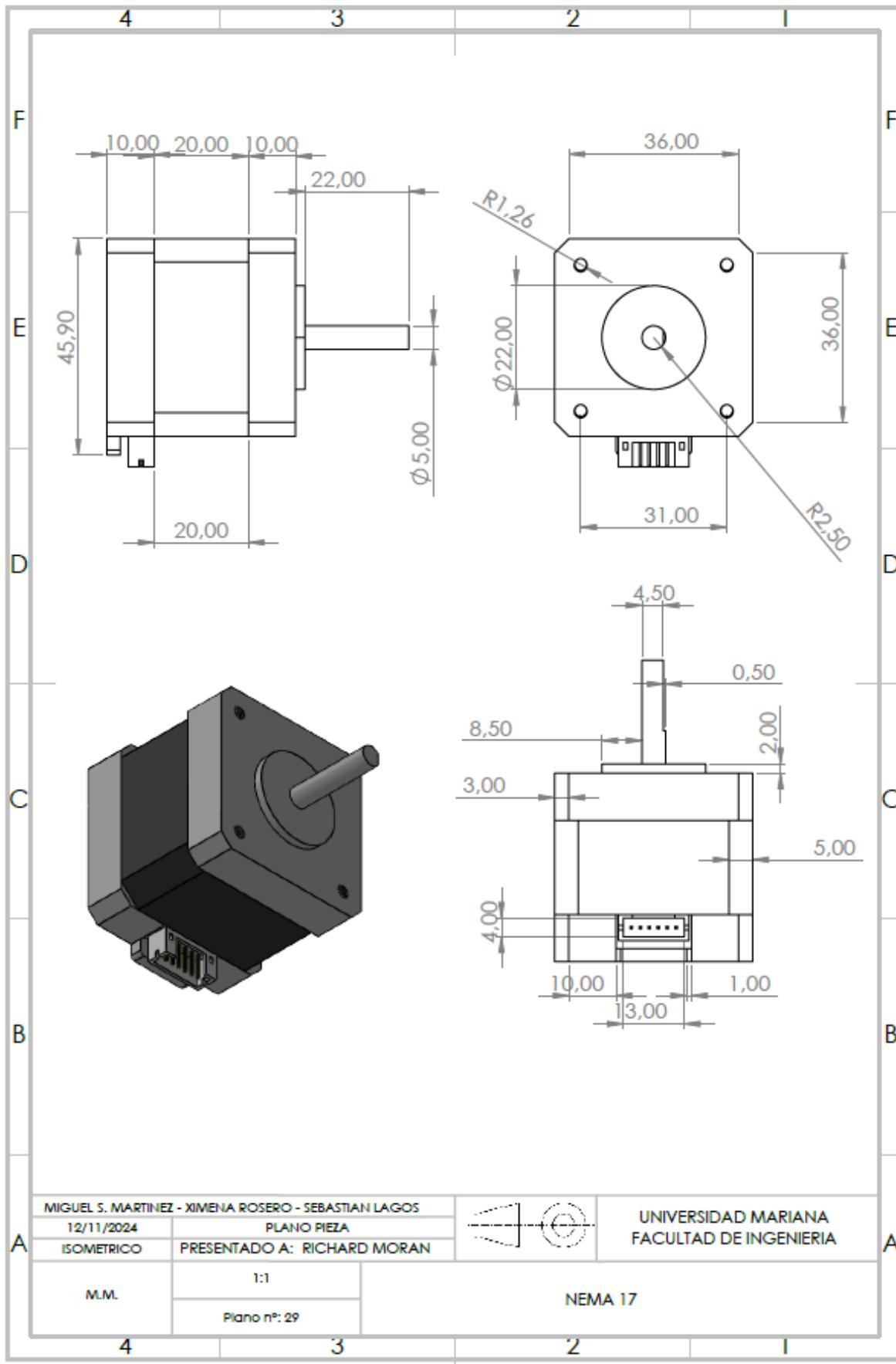


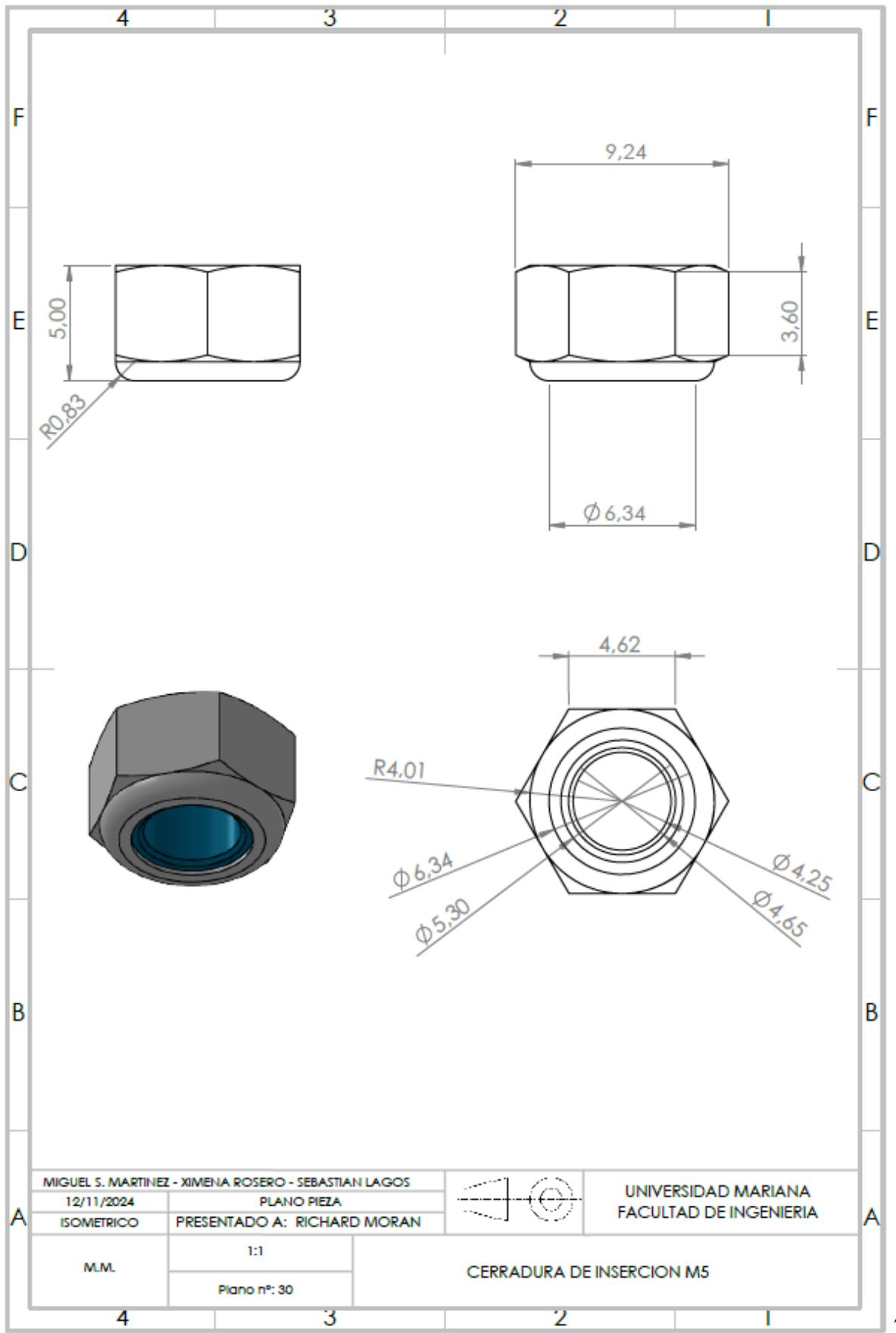


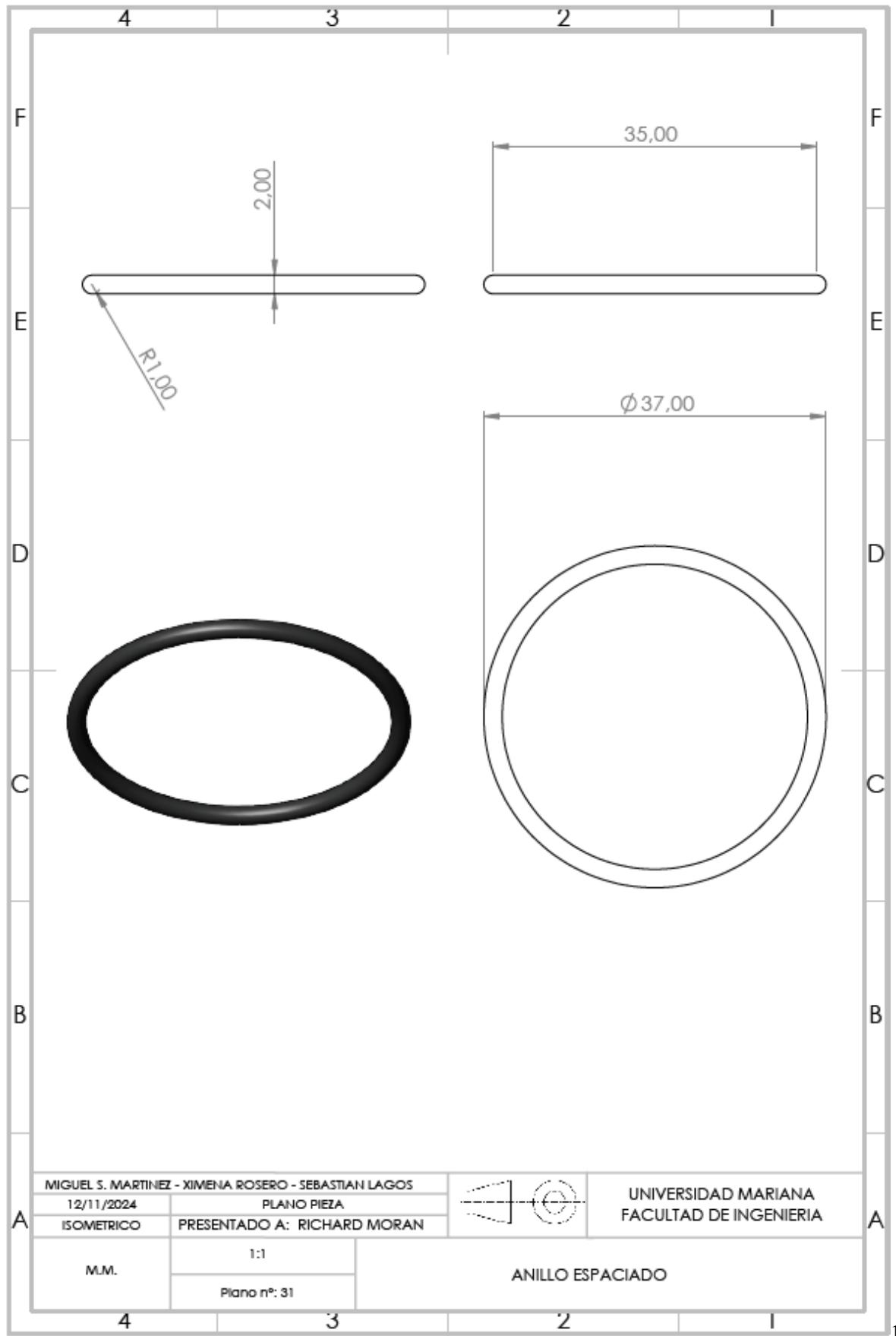


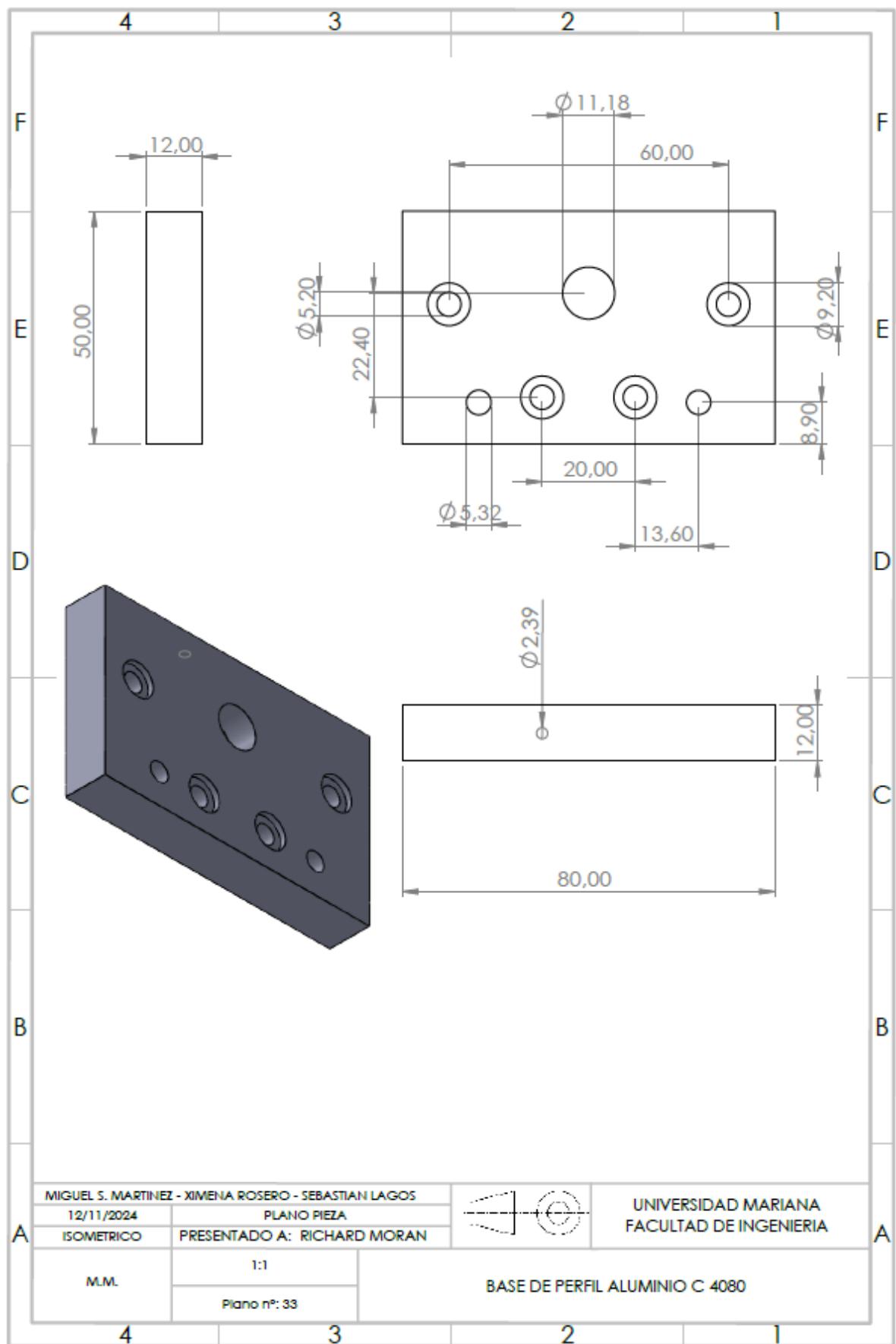


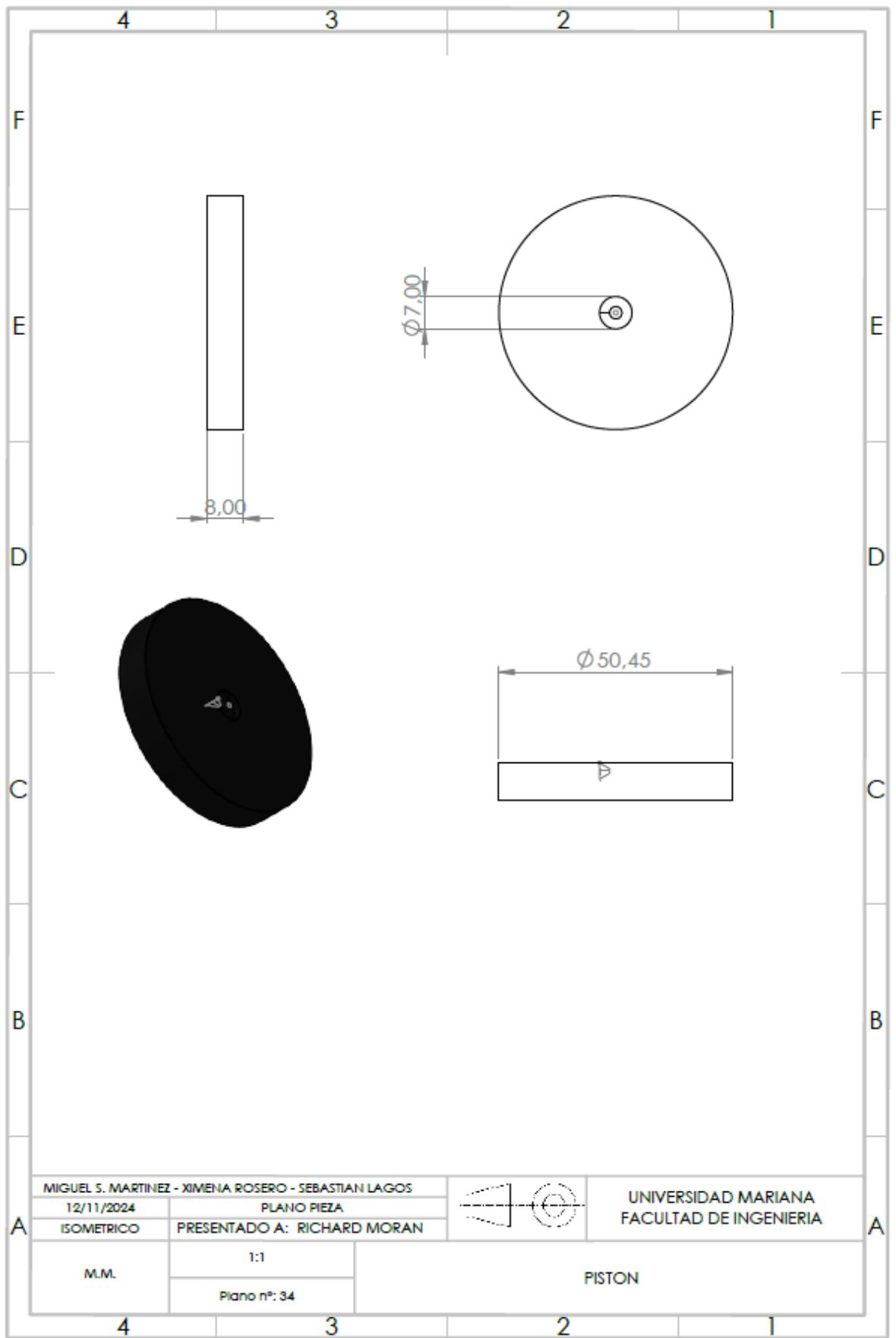


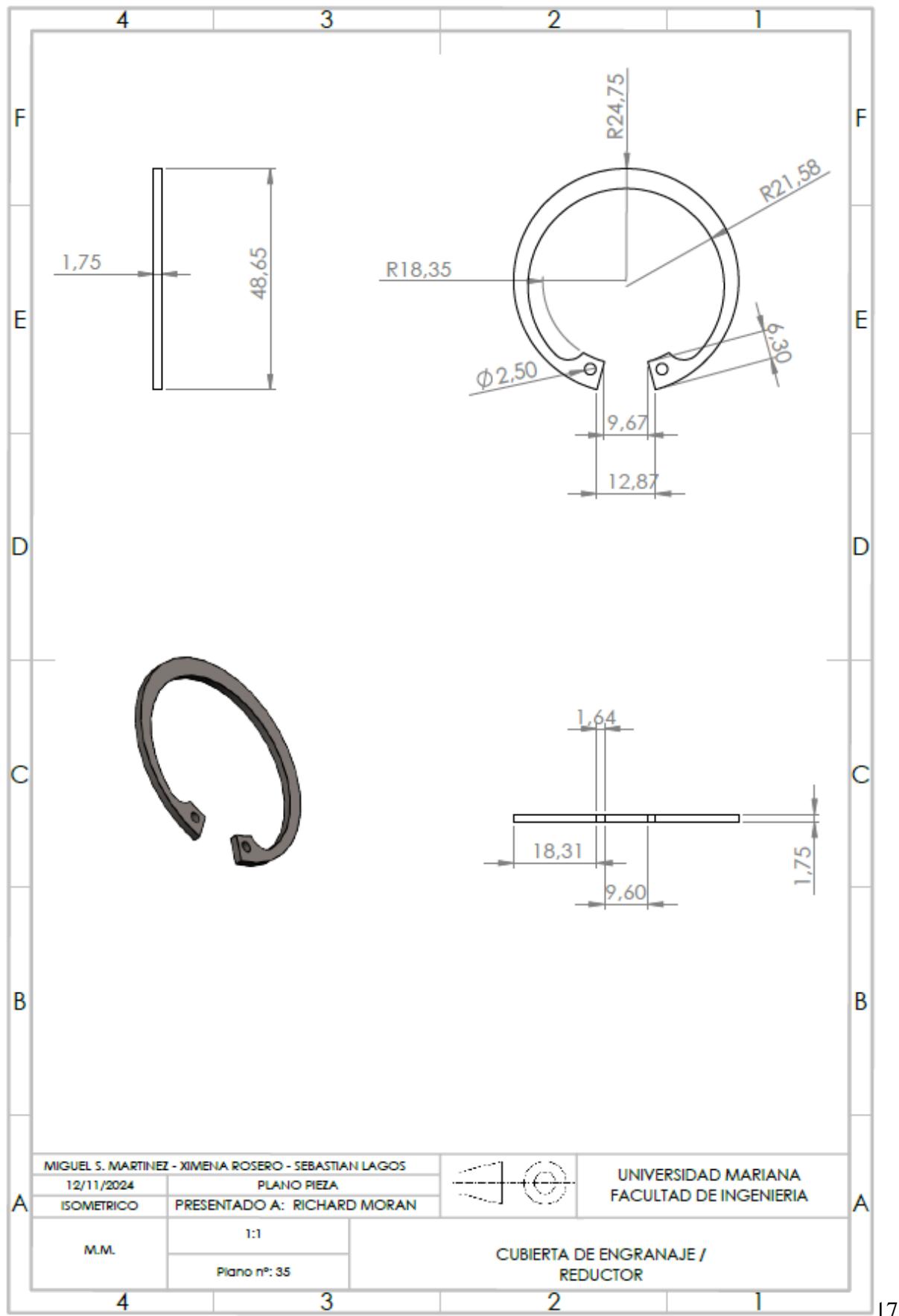


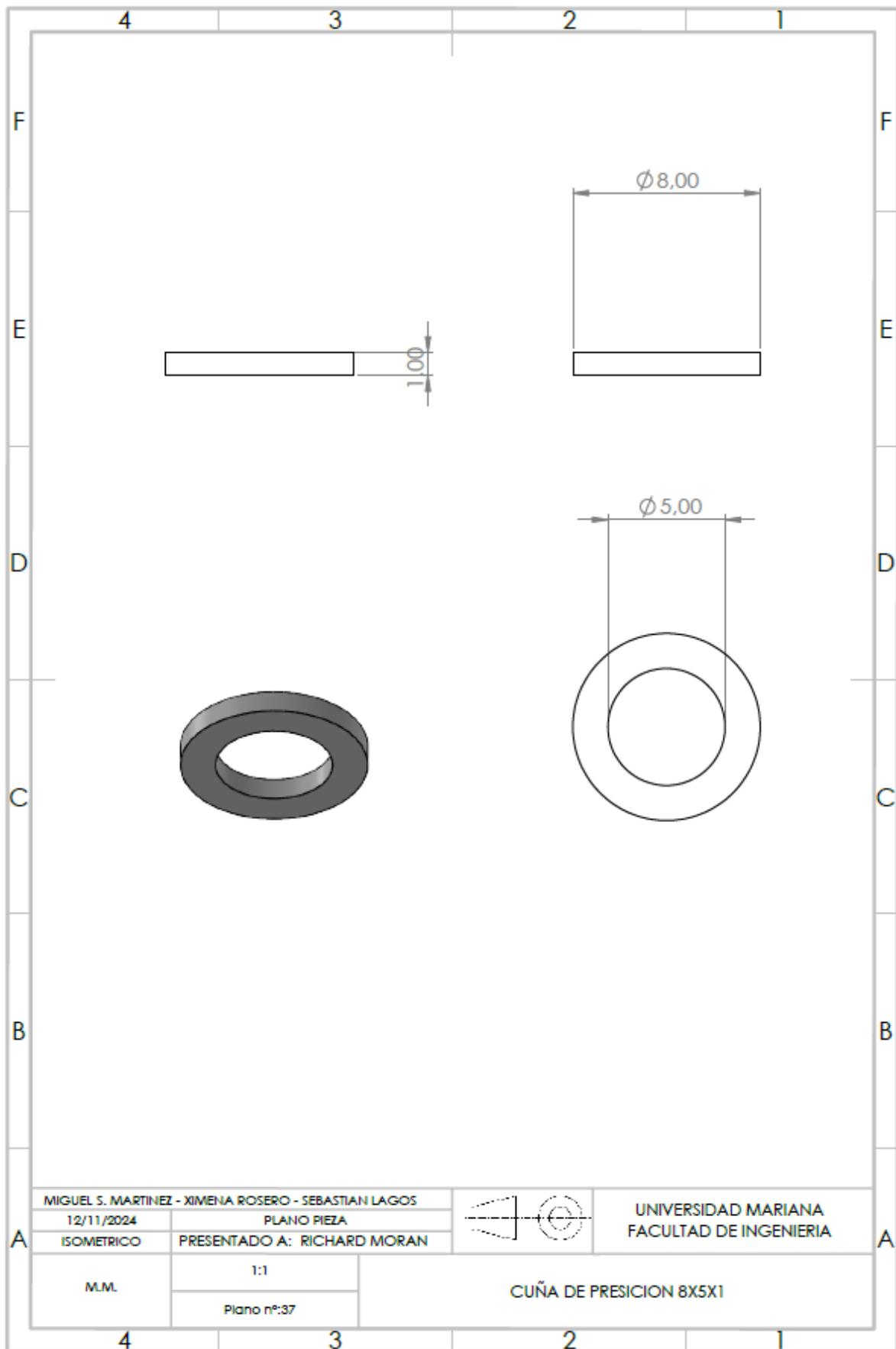


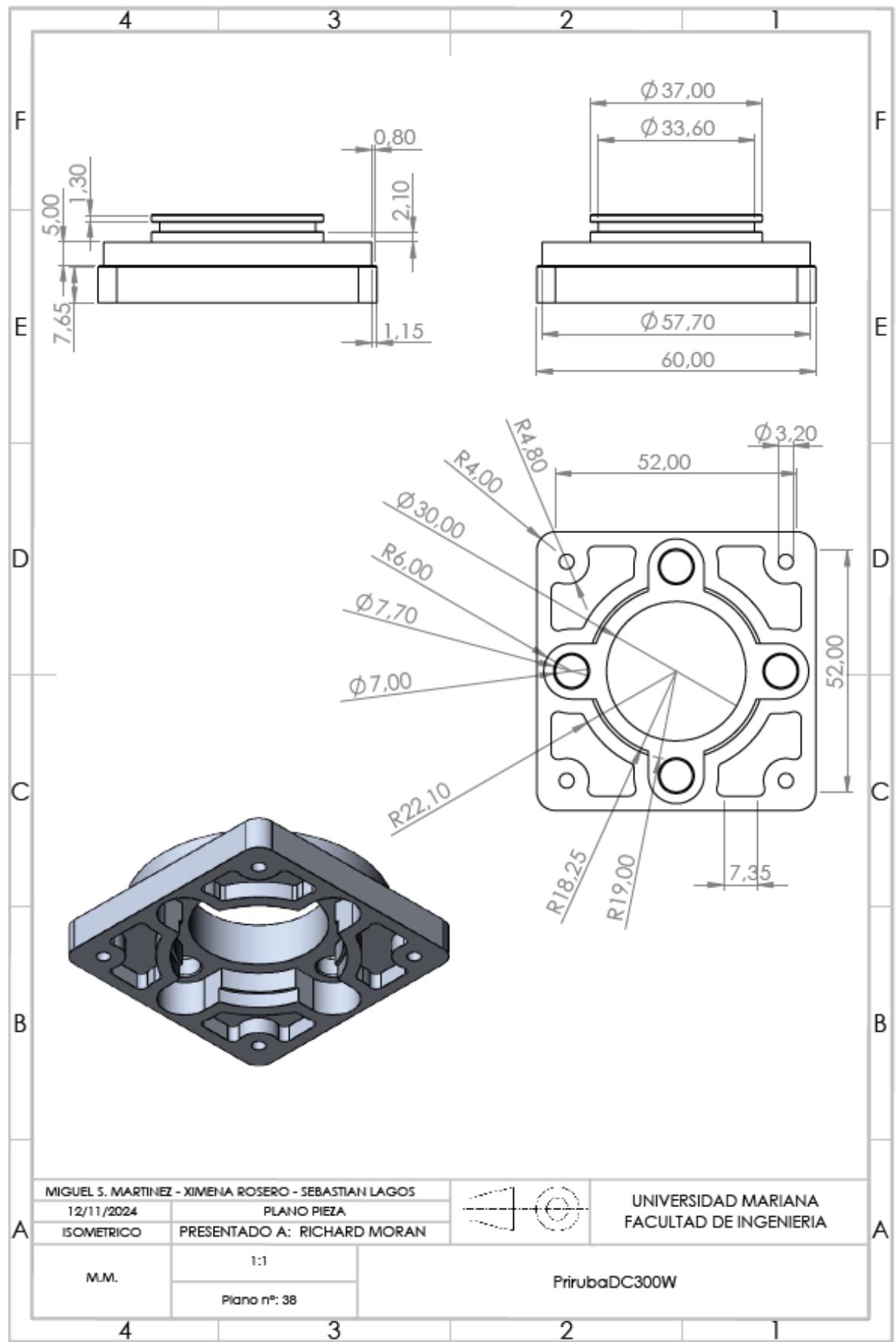


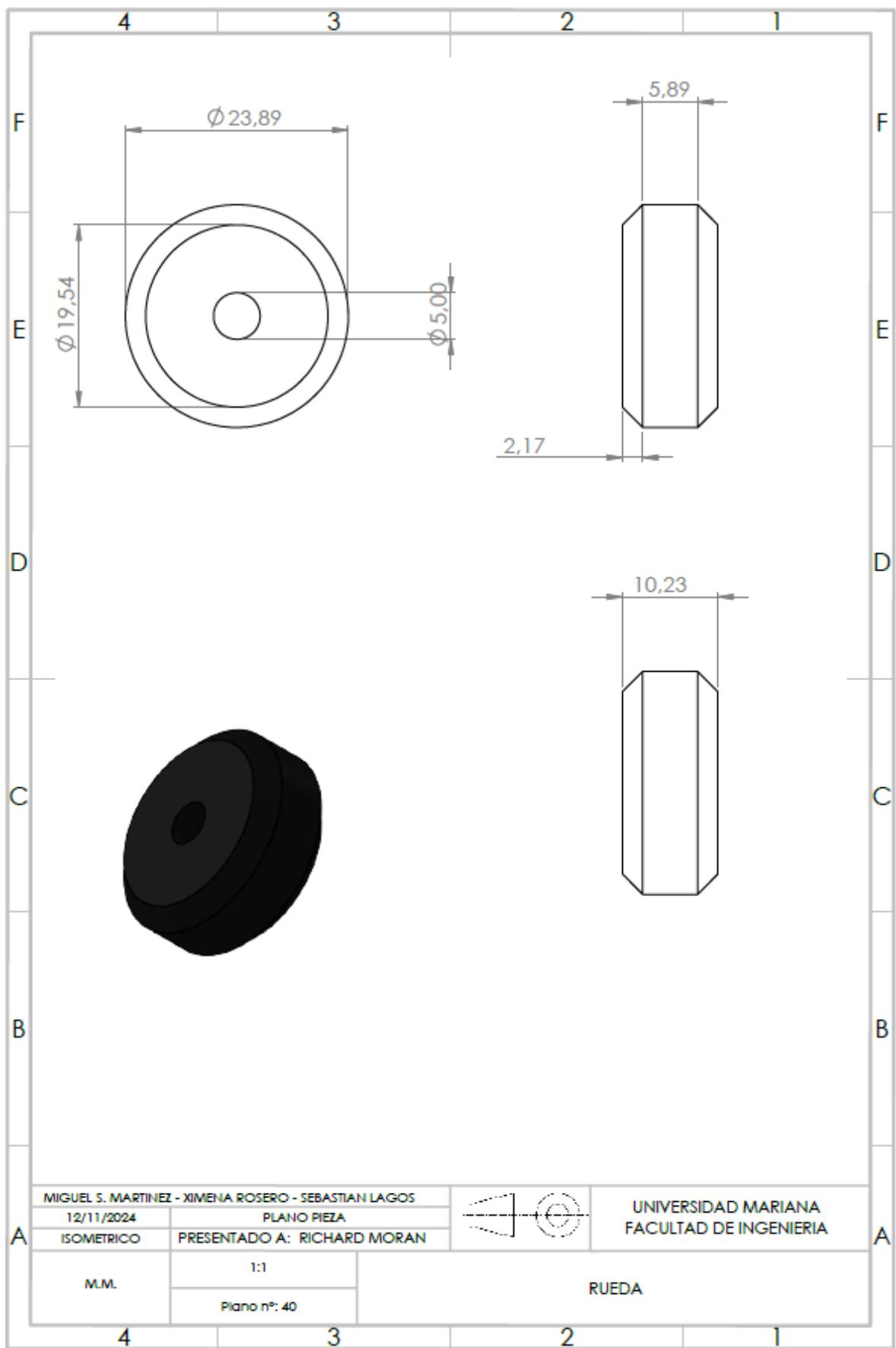


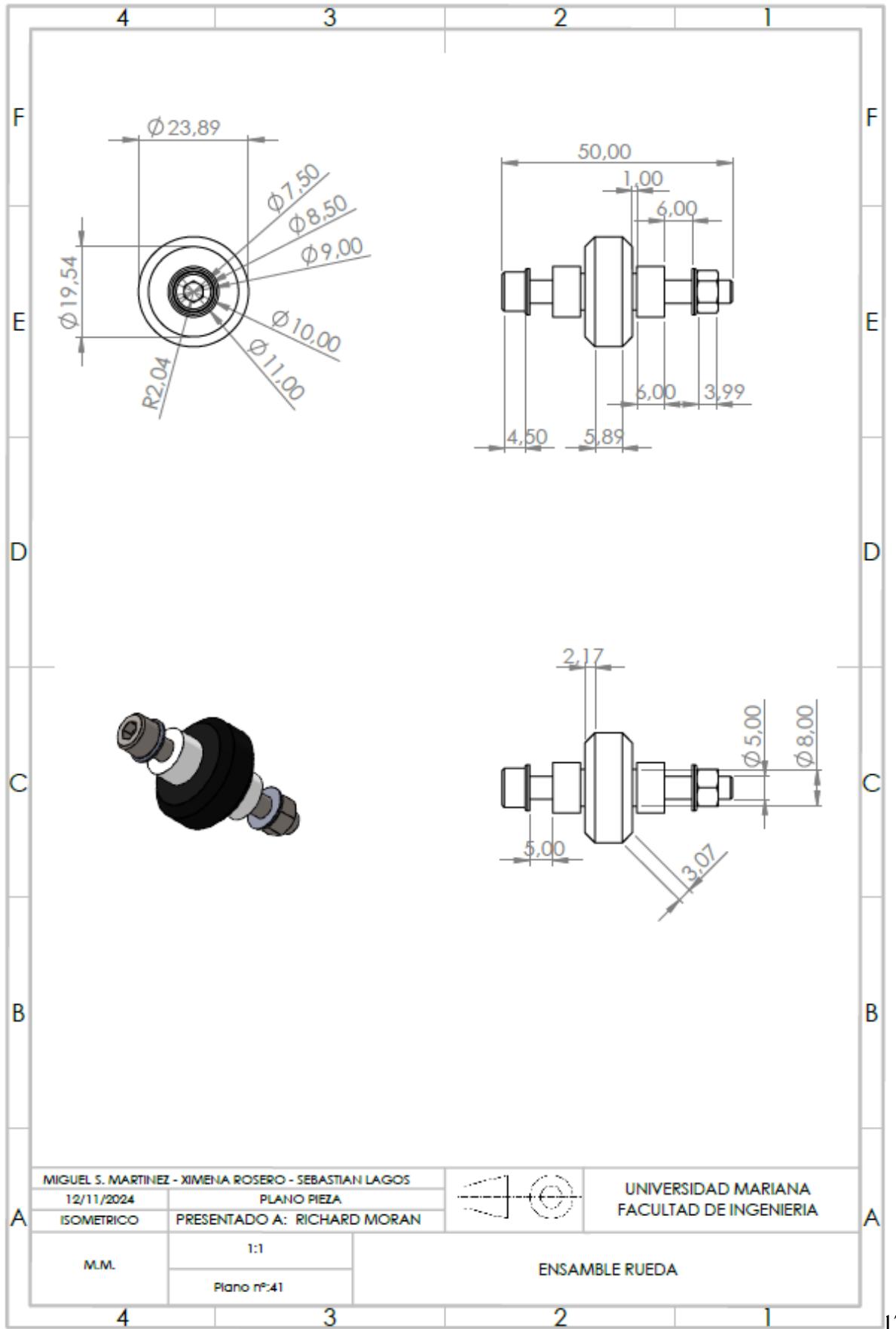


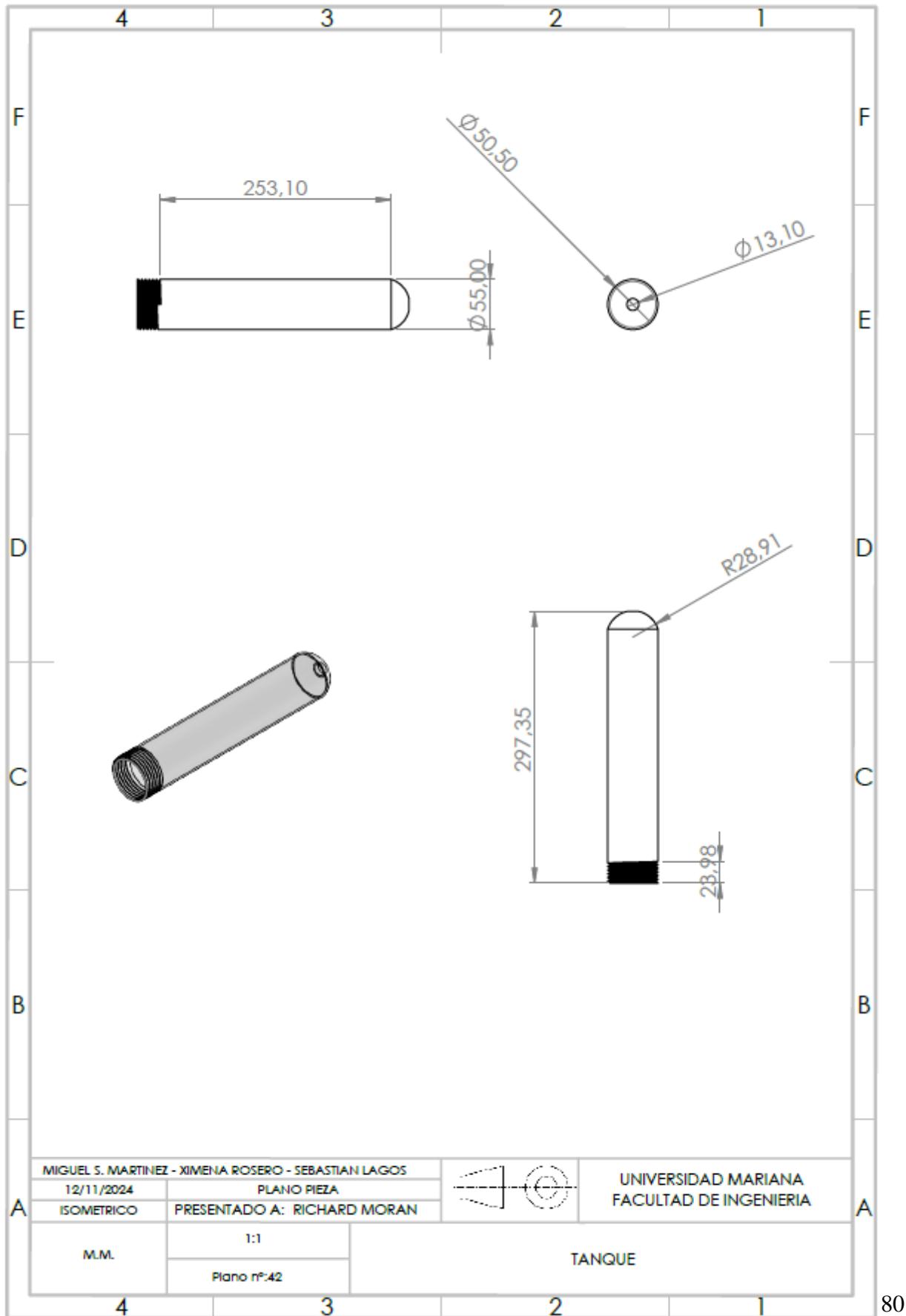


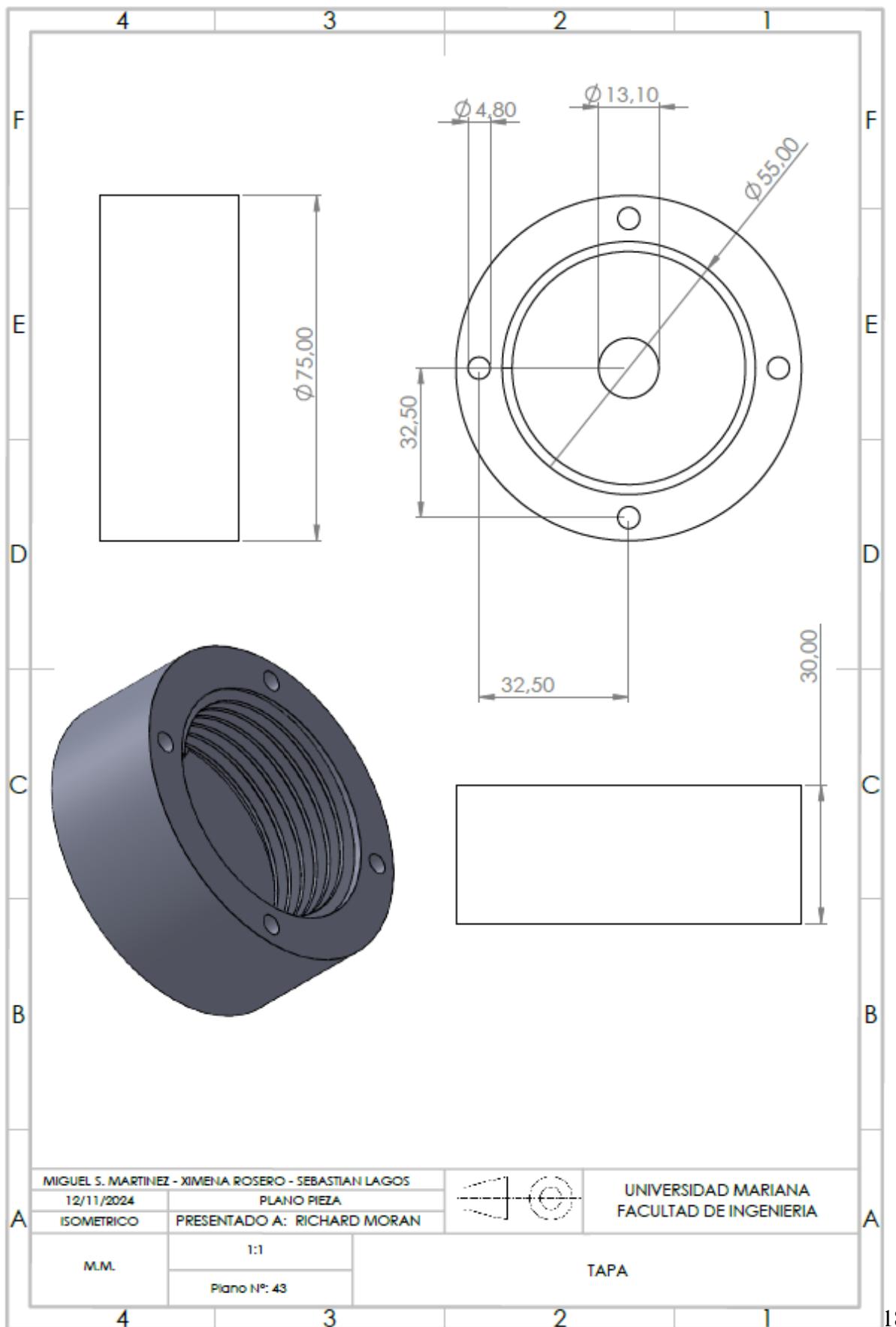


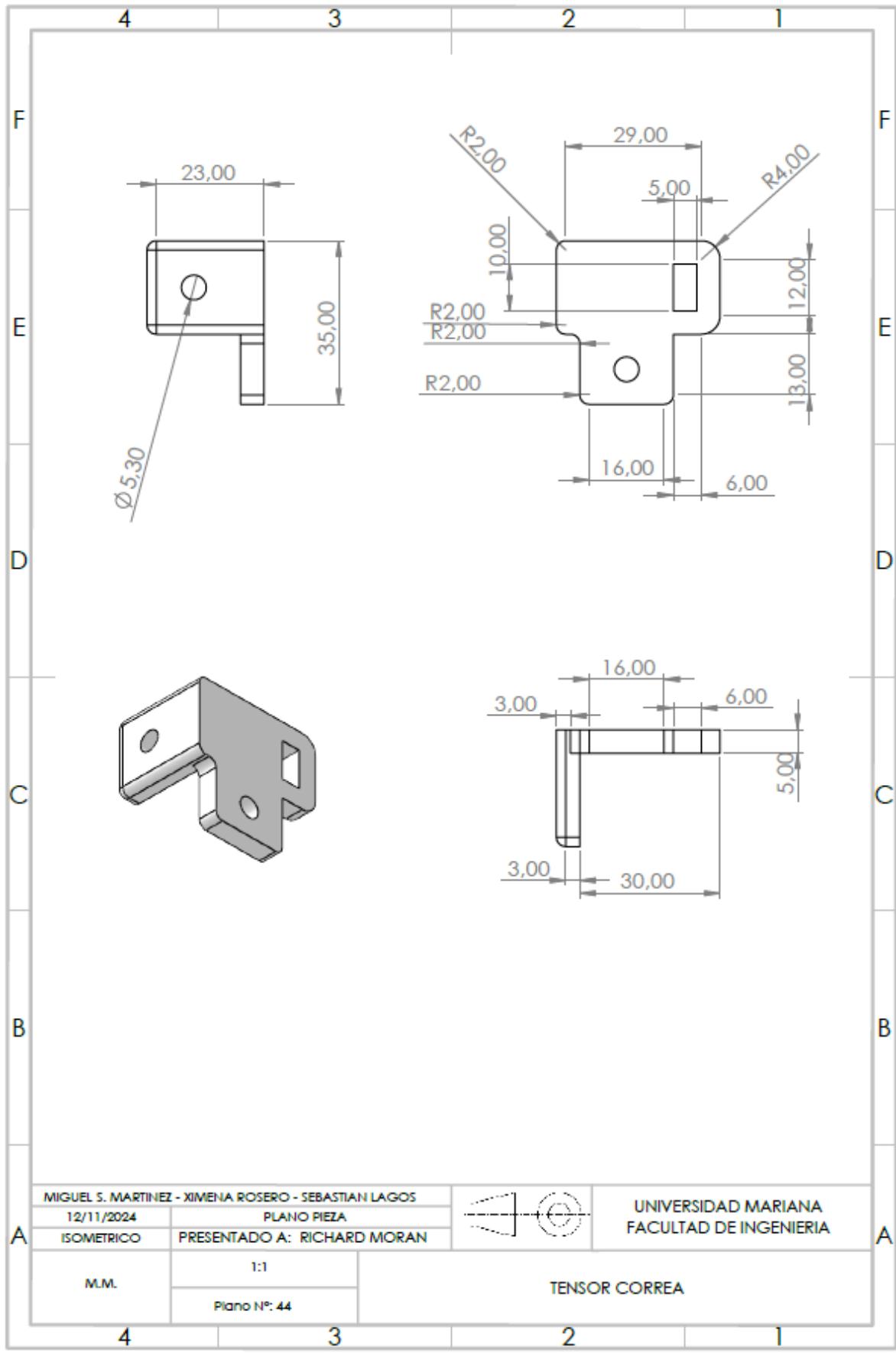


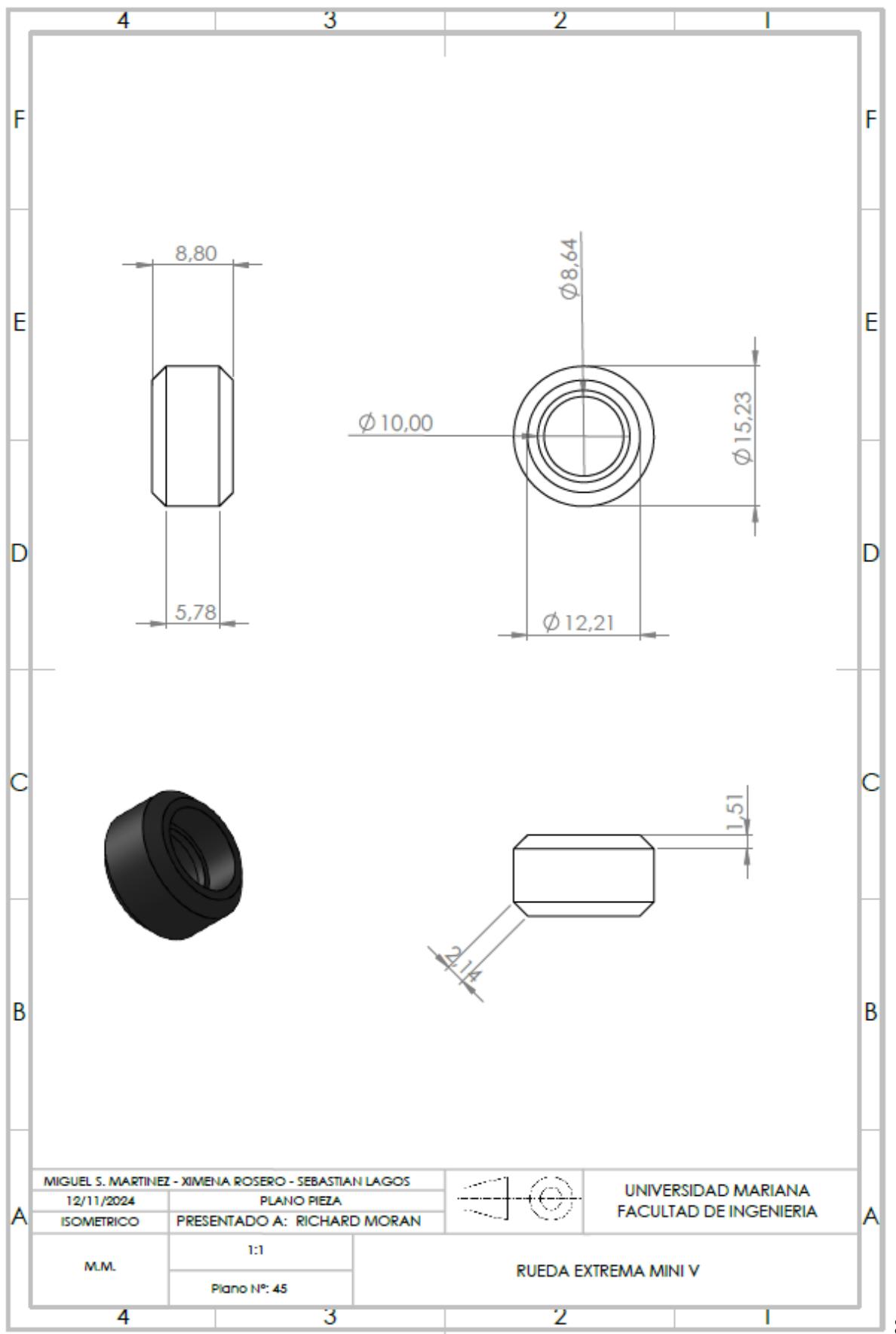


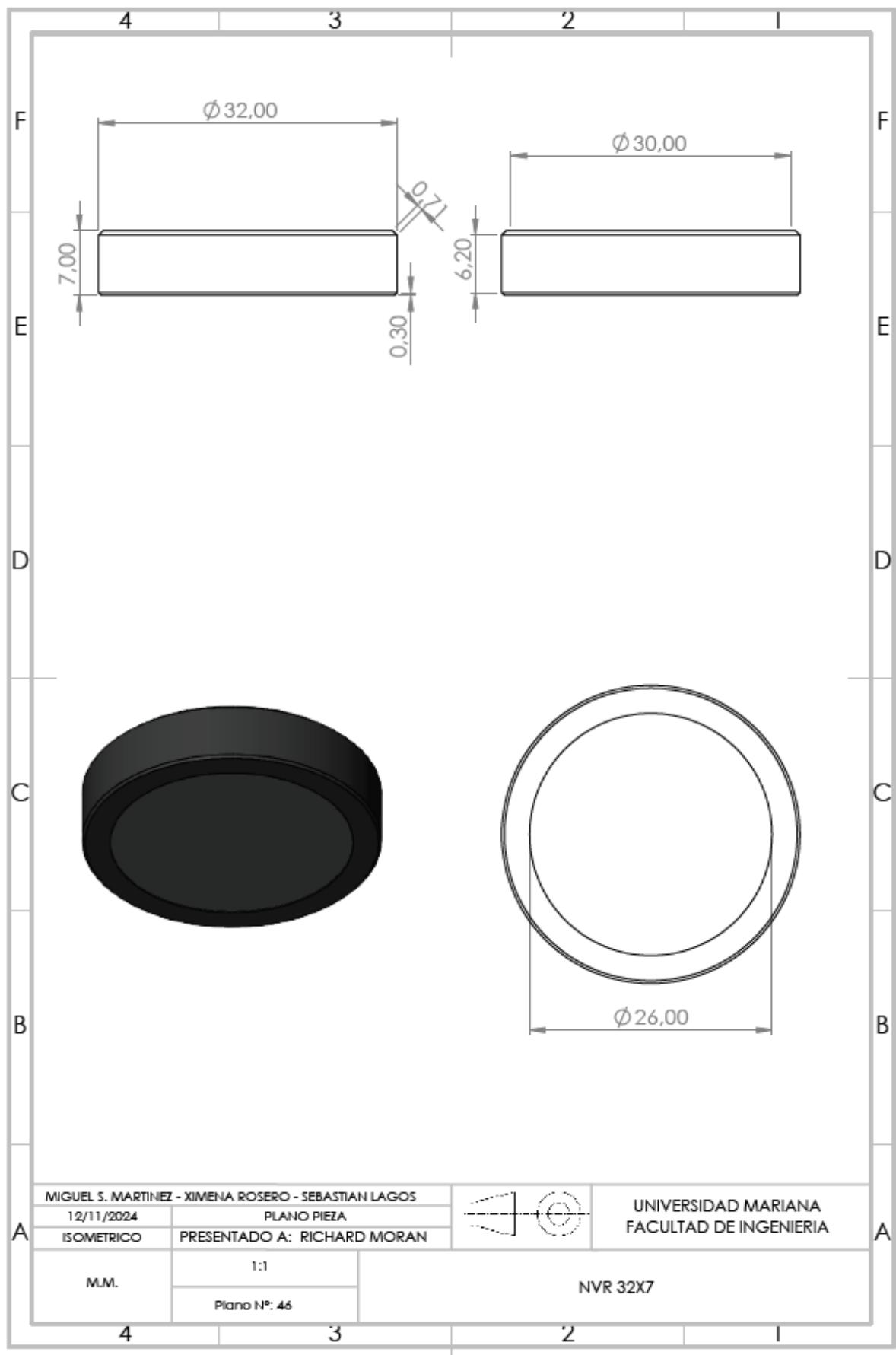


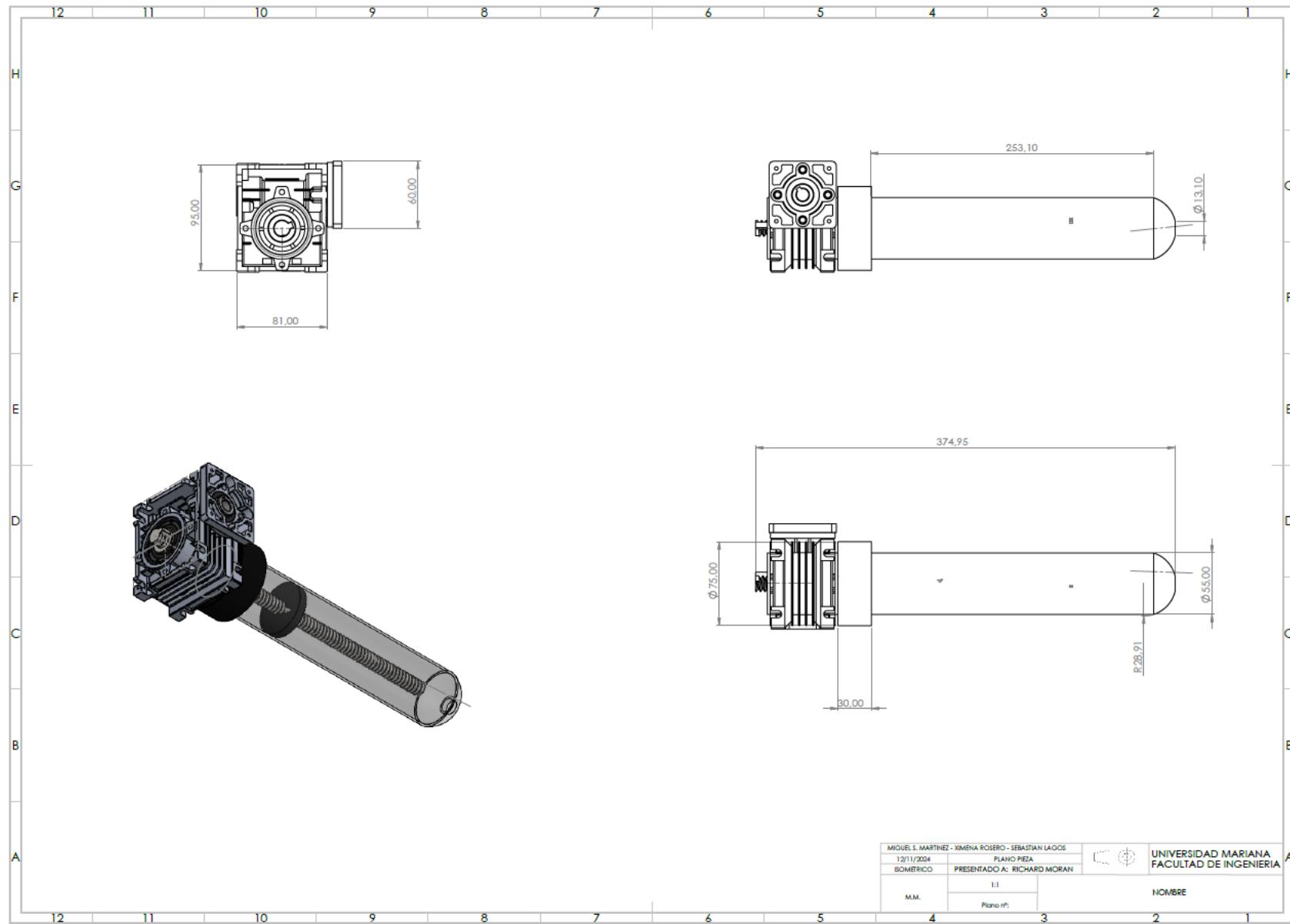












Anexo D. Diagrama de conexiones eléctricas

