



**Diseño y construcción de un prototipo de una máquina de electrohilado para la
obtención de membranas de ácido poli-láctico (PLA)**

Edgar Iván Amórtegui Ríos

20451811264

Víctor Alfonso López Chivata

20451818482

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2022

**Diseño y construcción de un prototipo de una máquina de electrohilado para la
obtención de membranas de ácido poli-láctico (PLA)**

Edgar Iván Amórtegui Ríos

Víctor Alfonso López Chivata

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

Ingeniero Mecánico

Directora:

Ing. MsC. Mercy Tatiana Villate Fonseca

Línea de Investigación:

Materiales

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Esp. Mercy Tatiana Villate Fonseca

Firma del Tutor

M.Sc. Orlando Díaz Parra

Firma Jurado

Ph. D. Nairo Cavieles

Firma Jurado

Tunja, 29 de Octubre de 2022.

CONTENIDO

Pág.

Agradecimientos.....	3
Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Abstract.....	6
1. ANTECEDENTES.....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Justificación	8
1.3 Objetivo general	9
<i>1.3.1 Objetivos específicos</i>	<i>9</i>
1.4 Alcance	10
1.5 Resultados esperados	10
2. MARCO TEORICO.....	11
2.1 Estudios previos.....	11
2.2 Electrohilado.....	13
2.3 Cono de Taylor	16
2.4 Parámetros que influyen en el proceso.....	17
2.4.1 Voltaje	17
2.4.2 Distancia entre la punta de la aguja y el colector	18
2.4.3 Flujo de salida.....	18
2.4.4 Colectores	18
2.4.5 Diámetro interno de la aguja	21
2.5 Parámetros ambientales	22
2.6 Parámetros que influyen en la solución.....	22
2.6.1 Efecto de la concentración del polímero.....	22
2.6.2 Efecto peso molecular.....	23
2.6.3 Viscosidad	23
2.6.4 Conductividad de la disolución	23
2.6.5 Solvente	24
2.6.6 Tensión superficial	25

2.7	Membranas poliméricas	26
2.8	Otras técnicas de electrohilado	27
2.8.1	<i>Electrospinning coaxial</i>	27
2.8.2	<i>Forcespinning o electrohilado por centrifugado</i>	28
2.8.3	<i>Electrospinning con doble componente o doble inyección</i>	30
2.9	Aplicaciones de proceso de electrohilado	30
2.9.1	<i>Aplicaciones en el área biomédica de las nanofibras</i>	31
2.9.2	<i>Aplicaciones en el área alimenticia de las nanofibras</i>	33
2.9.3	<i>Aplicaciones en el área textil de las nanofibras</i>	34
2.9.4	<i>Otras aplicaciones de las nanofibras</i>	35
3.	MATERIALES Y EQUIPOS	37
3.1	Materiales.....	37
3.1.1	<i>Ácido Poliláctico PLA</i>	37
3.1.2	<i>Motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V)</i>	38
3.1.3	<i>Módulo PWM variador de velocidad motores DC 6V~28V (3A)</i>	39
3.1.4	<i>Fuente conmutada de voltaje 12V - 10A - 120W DC</i>	40
2.1.5	<i>Mini Sw Interruptor de Codillo 6 Pines - 3 Posiciones</i>	41
3.1.6	<i>Aleación de aluminio</i>	41
3.1.7	<i>Jeringas</i>	42
3.1.8	<i>Agujas de jeringas</i>	43
3.1.9	<i>Rodamiento F688ZZ</i>	44
3.1.10	<i>Acrílico</i>	45
3.1.11	<i>Filamento de Tereftalato de polietileno con glycol (PETG)</i>	46
3.2	Equipos.....	47
3.2.1	<i>Impresora 3D Creality Ender 3</i>	47
4.	DISEÑO DE COMPONENTES DEL EQUIPO DE ELECTROHILADO.....	50
4.1	Diseño de elementos mecánicos del colector	50
4.1.1	<i>Análisis cinemático de engranajes del tren de transmisión del colector</i>	51
4.1.2	<i>Calculo de fuerzas y esfuerzos que se ejercen en los engranajes helicoidales</i>	60
4.1.3	<i>Diseño de fijación de elementos en los ejes</i>	67
4.1.4	<i>Diseño de ejes del tren de transmisión del colector</i>	67
4.1.5	<i>Selección de rodamientos cargas radiales y de empuje combinadas</i>	70
4.2	Diseño de los elementos mecánicos del sistema de inyección de la solución polimérica.....	71
4.2.1	<i>Análisis cinemático de tren de transmisión del sistema de dosificación</i>	72
4.2.2	<i>Análisis cinemático de transmisión piñón y cremallera</i>	79
4.2.3	<i>Calculo de fuerzas y esfuerzos que se ejercen en los engranajes del sistema de inyección</i>	80
4.2.4	<i>Diseño de ejes para los engranajes del sistema de dosificación</i>	88
4.2.5	<i>Selección de rodamientos</i>	89
4.3	Diseño de los elementos mecánicos que controlan la distancia entre el colector y la aguja.....	91

4.4	Análisis de resultados del diseño.....	92
5.	CONSTRUCCION DEL EQUIPO DE ELECTROHILADO	93
5.1	Fabricación de piezas por impresión 3D	93
5.2	Fabricación de soportes de mecanismos del colector y sistema de dosificación 94	
5.3	Ensamble de piezas.....	95
6.	PRUEBAS FUNCIONALES	97
7.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	99
8.	CONCLUSIONES	100
	ANEXOS.....	101
	PLANOS	107
	REFERENCIAS.....	149

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama esquemático de la configuración de aparatos de electrohilado (a) disposición vertical y (b) disposición horizontal.	15
Figura 2. Representación de las etapas de formación del cono de Taylor en un equipo de electrohilado.....	17
Figura 3. Diagrama esquemático montaje colector plano (a) disposición vertical y (b) disposición horizontal.	19
Figura 4. Montaje de electrohilado con colector cilíndrico rotatorio.	20
Figura 5. (a) Imágenes SEM de fibras electrohiladas aleatoriamente orientadas; (b, c y d) Imágenes SEM de fibras electrohiladas alineadas obtenidas con un colector rotatorio con una velocidad de rotación de 1200, 2500 y 3800 rpm, respectivamente.	21
Figura 6. Electrospinning coaxial.	28
Figura 7. Método Forcespinning.....	29
Figura 8. Diagrama proceso de electrohilado de doble flujo.	30
Figura 9. Motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V).....	38
Figura 10. Módulo PWM variador de velocidad Motores DC 6V~28V.	39
Figura 11. Fuente Conmutada de Voltaje 12V - 10A - 120W DC	40
Figura 12. Mini Sw interruptor de codillo 6 pines - 3 posiciones	41
Figura 13. Jeringa desechable	43
Figura 14. Aguja desechable.....	44
Figura 15. Rodamiento F688ZZ	44
Figura 16. Impresora 3D Creality Ender 3	48
Figura 17. Características de los dientes de engranajes rectos	52
Figura 18. Piezas fabricadas por impresión 3D	94
Figura 19. Soporte con corte laser	95
Figura 20. Conjunto ensamblado del sistema de dosificación.....	95
Figura 21. Conductividad eléctrica colector	96

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de diferentes solventes usados en el proceso de electrohilado.....	24
Tabla 2. Parámetros con sus respectivas características.....	25
Tabla 3. propiedades del PLA.....	37
Tabla 4. Características principales motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V).....	38
Tabla 5. Características Modulo PWM variador de velocidad motores DC 6V~28V.....	39
Tabla 6. Características principales Fuente Conmutada de Voltaje 12V - 10A - 120W DC	40
Tabla 7. características principales mini Sw interruptor de codillo 3 pines - 2 posiciones	41
Tabla 8. Composición química del metal de aluminio de aleación 3004.	42
Tabla 9. Datos físicos del metal de aluminio de aleación 3004.....	42
Tabla 10. Rodamiento F688ZZ.....	45
Tabla 11. Propiedades físicas y mecánicas del PETG con respecto al PLA.....	47
Tabla 12. Características y especificaciones técnicas de la impresora 3D Creality Ender 3.	49
Tabla 13. fórmulas para características de dientes de engranes para un ángulo de presión de 20°	54
Tabla 14. Numero de dientes para asegurar que no haya interferencia	56
Tabla 15. Resultados propiedades de dientes de engranajes helicoidales.....	59
Tabla 16. Fuerza en los dientes de engranajes del colector	62
Tabla 17. Factores de geometría engranajes colector	64
Tabla 18. Numero de esfuerzos flexionante en los dientes de cada engranaje del tren de trasmisión colector	64
Tabla 19. Numero de esfuerzos de contacto en los dientes de los engranajes.....	65
Tabla 20. propiedades de dientes primera pareja de engranajes	75
Tabla 21. Propiedades dientes segunda pareja de engranajes	75
Tabla 22. Propiedades de diente tercera pareja de engranajes	76
Tabla 23. Propiedades de diente cuarta pareja de engranajes	76
Tabla 24. Propiedades de dientes quinta pareja de engranajes	77
Tabla 25. Propiedades de dientes sexta pareja de engranajes	77
Tabla 26. Propiedades de dientes séptima pareja de engranajes.....	78
Tabla 27. Propiedades de dientes piñón cremallera.....	79
Tabla 28. fuerzas en los dientes de los engranajes del sistema de dosificación	83
Tabla 29. Factores de geometría J de engranajes sistema de dosificación	85
Tabla 30. Numero de esfuerzos flexionantes del tren de trasmision del sistema de dosificación	86
Tabla 31. Numero de esfuerzos de contacto del tren de engranajes del sistema de dosificación	87

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios y a la santísima virgen por las grandes bendiciones que nos han dado como lo es la salud, sabiduría, el hogar, una familia, amigo y demás familiares que dan la motivación necesaria para poder poner en marcha este proyecto que nos inspira a superarnos y enriquecer aún más las habilidades y aptitudes que cada uno de nosotros tienen.

En segundo lugar, agradezco a mi señora madre y a mi núcleo familiar, ya que han sido el motor en mi vida que me ha impulsado a seguir adelante superando diversas adversidades pero que me han dado la fortaleza y el valor agregado de poder cumplir con mis metas propuestas. Brindándome de manera incondicional el apoyo que he necesitado en los momentos más difíciles en los que me he encontrado, pero que han ayudado en mi crecimiento personal.

También agradezco a la Esp. Mercy Tatiana Villate Fonseca directora de este trabajo de grado ya que sin la colaboración de ella no hubiese sido posible la realización y culminación de este trabajo. Además, agradezco a cada un de los docentes de la universidad quienes enriquecieron con cada una de las enseñanzas no solamente para la vida profesional sino personal.

Agradecimientos

Esta es la parte más compleja de redactar, aun siendo la primera y menos técnica de todas, debido a que no hay palabras para expresar tantos sentimientos de agradecimiento frente a cada una de las personas que forjaron en lo posible el desarrollo de este trabajo.

Primero que todo agradezco a Dios que nos ha ayudado día a día y nos ha dado la fortaleza, sabiduría, paciencia y perseverancia para seguir adelante con cada uno de nuestros planes, proyectos y retos tanto personales como profesionales que nos hemos trazado, ya que sin su ayuda nada sería posible.

Agradezco a cada uno de los integrantes de mi familia puesto que son ellos el motor que me da la fuerza para levantarme todos los días y continuar en la lucha por alcanzar cada una de las metas que me he trazado y que con el apoyo de ellos están cada vez más cerca.

Doy gracias a nuestra directora de proyecto la Esp. Mercy Tatiana Villate Fonseca por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto, también a cada uno de nuestros docentes durante estos años de estudio ya que gracias a ellos logramos obtener los conocimientos necesarios para llegar hasta aquí.

No puedo dejar de mencionar el agradecimiento hacia nuestros compañeros y amigos de este proceso de formación ya que cada uno de ellos de diferentes maneras nos aportaron aprendizajes los cuales contribuyeron a nuestro desarrollo tanto personal como profesional.

Resumen

El estudio de nano y microestructuras ha hecho que el ser humano tenga la necesidad de investigar nuevos métodos y tecnologías que permitan ampliar el diagnóstico en el análisis para los polímeros por su gran variedad de aplicación. Por lo anterior se establecieron los parámetros representativos que determinaron las características técnicas del prototipo de equipo de electrohilado para la obtención membranas de PLA. Seguido, se diseñaron los elementos que componen el prototipo teniendo en cuenta los parámetros definidos, se continuo con la construcción del prototipo de la máquina de electrohilado con base al diseño realizado y finalmente se realizaron pruebas funcionales del prototipo simulando físicamente las variables y propiedades de la solución polimérica a las que estaría expuesto el prototipo durante el proceso de electrohilado en la obtención de membranas de PLA, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la ciudad de Tunja con diferentes características morfológicas.

PALABRAS CLAVE: Diseño equipo electrohilado, membranas de ácido poliláctico, membranas electrohiladas.

Abstract

The study of nano and microstructures has made it necessary for human beings to investigate new methods and technologies that allow to extend the diagnosis in the analysis for polymers for its great variety of application. Therefore, the representative parameters were established that determined the technical characteristics of the prototype of electrospinning equipment for obtaining PLA membranes. Then, the elements that make up the prototype were designed taking into account the parameters defined, continued with the construction of the prototype of the electrospinning machine based on the design made and finally functional tests of the prototype were performed physically simulating the variables and properties of the polymer solution to which the prototype would be exposed during the electrospinning process in the production of PLA membranes, taking into account the environmental conditions of the city of Tunja with different morphological characteristics.

KEY WORDS: Design electrospinning equipment, polylactic acid membranes, electrospinning membranes.

1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción

En la actualidad la constante evolución y la aparición de nuevas nano y micro tecnologías, ha estado en constante desarrollo, generando así gran demanda en áreas como la biotecnología, biomédica, síntesis química, agricultura, industria de alimentos, optimización en procesos de producción entre otras.(Robles-García et al., 2014) Según el tipo de aplicación y los requerimientos que estas necesiten, se pueden usar varios métodos de síntesis y de procesos con los cuales se pueden obtener diferentes formas y estructuras como lo son los nanotubos, nanovarillas, nanoalambres, esferas, nano y microfibras las cuales durante su proceso de obtención de pueden crear membranas. Existen varias técnicas para obtener microfibras dentro de las cuales está el electrohilado o electrospinning (por su significado en inglés).(Sánchez et al., 2013)

El electrohilado se usa para la obtención de fibras microscópicas con propiedades únicas en su estructura, además se pueden obtener a partir de diversos materiales poliméricos disueltos en solventes con propiedades físicas, volátiles y dieléctricas, facilitando así la obtención de micro y nano fibras que a su vez y durante el proceso van a formar membranas, mejorando las propiedades iniciales del material base. Adicionalmente permite obtener fibras de diversos tamaños, haciendo que esta técnica sea muy útil en la obtención final de membranas que tienen una gran variedad de aplicaciones en el área industrial, alimenticia y biomédica.(Robles-García et al., 2014)

El proceso de electrohilado convencional se realiza por medio de una jeringa en la cual se encuentra la mezcla homogénea de polímero y solvente, una aguja unida a la jeringa

permite la dosificación de la solución polimérica, un colector en el que se reciben las micro, nanofibras y finalmente membranas, y una fuente de alto voltaje conectada a un extremo de sus salidas de tensión por una pinza con carga positiva a la aguja y a su vez una conexión negativa al colector, cerrando así el circuito eléctrico. El campo eléctrico que se genera entre el colector y la aguja hace que la solución polimérica empiece a fluir hacia el colector en forma de hilos muy finos los cuales en el trayecto se solidifican al evaporarse el solvente y las micro y nanofibras se van depositando en el colector formando así la membrana electrohilada.

1.2 Justificación

La elaboración de este proyecto es muy significativo para aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación del pregrado de Ingeniería Mecánica porque permite poner en práctica, y contribuir en el desarrollo y avance tecnológico de los diferentes equipos que disponen los laboratorios de la universidad, con esta máquina de electrohilado los estudiantes podrán tener una herramienta adicional la cual les permitirá estudiar y analizar experimentalmente y a profundidad las estructuras micro y manométricas como lo es en este caso el análisis de las membranas de ácido poli-láctico (PLA), estas mismas estructuras podrán ser utilizadas en aplicaciones tanto en el ámbito industrial, biomédica y alimenticia.

Además se busca que los estudiantes recién ingresados se interesen por estos nuevos métodos y procesos de obtención y así puedan profundizar en el estudio de materiales nuevos y ampliar el conocimiento de los materiales ya existentes, no solamente su composición, sino también en la infinidad de aplicaciones que estos tienen basados a su vez

en los diferentes métodos de obtención y estructuras que se pueden llegar a tener y finalmente que lo puedan poner en práctica y con esto lograr algo diferente e innovador.

Con el estudio de este método no solamente se puede logra un desarrollo en el conocimiento de tecnologías poco conocidas, sino que además se puede lograr un crecimiento económico al poder caracterizar membranas que tengan aplicaciones cotidianas en la región y de esta manera brindar soluciones a problemáticas o necesidades de la población y que a su vez generen una fuente de ingreso y así mejorar el desarrollo social de la comunidad.

1.3 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de una máquina de electrohilado para obtención de membranas a base de ácido poli-láctico (PLA).

1.3.1 Objetivos específicos

- 1) Establecer los parámetros representativos para determinar las características técnicas del prototipo de equipo de electrohilado de membranas de PLA.
- 2) Diseñar los elementos que componen el prototipo teniendo en cuenta los parámetros definidos en el objetivo 1.
- 3) Construir el prototipo de la máquina de electrohilado con base al diseño obtenido del objetivo 2.
- 4) Realizar pruebas funcionales del prototipo con la obtención de membranas de PLA.

1.4 Alcance

El presente proyecto comprende la construcción del prototipo de electrohilado, se realizarán pruebas funcionales que permitan que los mecanismos funcionen correctamente y así puedan controlar variables para la obtención de membranas del polímero base PLA, con el propósito de aportar con un equipo para complementar la formación de los estudiantes en las diferentes asignaturas de estudio de materiales.

1.5 Resultados esperados

Con la finalización de este proyecto se espera contar con el prototipo de la máquina de electrohilado para la obtención de membranas a base de ácido Poliláctico (PLA), obteniendo experimentalmente el correcto funcionamiento de los mecanismos para la obtención de membranas de este polímero con su respectivo manual de funcionamiento y precauciones en la utilización del equipo a construir.

2. MARCO TEORICO

2.1 Estudios previos

Silva E. S. En su proyecto, “diseño y construcción de una máquina de electrohilado vertical de 0 a 15kV para generar nanofibras a base del polímero polixilosano” seleccionó la fuente de alto voltaje con un rango 10 y 15kV adecuada para la obtención de nanofibras a base del polímero polixilosano. Continuo con la selección del accionamiento que permite el movimiento vertical de la mesa o colector en el que se van a depositar las nanofibras, usando como accionamiento aire a presión y un pistón de efecto simple, controlado mediante una electroválvula 5/3 que permite modificar con precisión el desplazamiento de la mesa o colector como el usuario lo necesite. Se utilizó para el sistema de dosificación del polímero el mismo principio para el desplazamiento vertical del colector, usando un pistón de efecto simple que acciona una jeringa permitiendo controlar la dosificación de la mezcla polimérica a través de una aguja, obteniendo durante este proceso las nanofibras de polixilosano. Finalmente con la obtención de nanofibras con un voltaje de 13kV y una distancia de 10cm entre la aguja y el colector se estudia el diámetro con un microscopio de barrido observando así fibras de 0,73 μ m.(Ruiz Silva, 2020)

Serna L., Rodriguez A y Albán F. En su artículo de " ácido poli-lactico (PLA): propiedades y aplicaciones)" presento una revisión actualizada de las formas de polimerización, propiedades físicas y mecánicas del ácido poli-lactico. Tambien menciono el método de producción del PLA, los mecanismos de reabsorción y biodegradabilidad y sus diversos campos de aplicación como lo es en la industria alimenticia y aplicaciones medicas.(C et al., 2003)

González M., Alcalde A., Valverde V. Y Villanueva D. en su artículo "Electrospinning, avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina" menciona que el Electrospinning o hilado electrostático de fibras es un método moderno y eficiente (Molfino et al., 2020) para la obtención de fibras muy finas por medio de un campo eléctrico permitiendo la fabricación de membranas organizadas por unidades de nano y microfibras. Adicionalmente explico una revisión del proceso de electrohilado, de sus productos utilizando matrices a base de polímeros naturales como: colágeno, quitosano, ácido hialurónico, seda, celulosa, PLLA y PEG. Y polímeros biodegradables o sintéticos como: ácido poli-láctico (PLA), óxido de polietileno (PEO), policaprolactona (PCL) y ácido poli(láctico-glicólico) (PLGA). Adicionalmente menciona algunas de sus aplicaciones en la biomedicina en el diseño de scaffolds para la formación de cartílagos, huesos, arterias, regeneración de la piel y nervios, (Molfino et al., 2020) y aplicaciones en la ingeniería de tejidos óseos. (Molfino et al., 2020)

Herrero A. En su trabajo de grado "diseño y puesta a punto de una cámara de electrohilado con control de temperatura y humedad ambiental" diseñó una cámara de electrohilado para obtener nanofibras, estudió el proceso de electrohilado y los parámetros que intervienen en el correcto funcionamiento de los elementos y equipos que conforman una máquina de electrohilado, adicionalmente analizó los efectos presentes en la obtención de fibras electrohiladas ocasionados por las variables de temperatura y humedad que intervienen en la cámara de electrohilado. Construyó una cámara prototipo siguiendo los lineamientos de diseño, utilizando perfiles de aluminio en su estructura colocando en su interior los elementos y equipos de electrohilado y continuó con las pruebas de electrohilado usando una disolución de P (MA-co-MMA) con 12% de DMF. (Herrero Carrión, 2015)

obteniendo en los ensayos realizados nanofibras, al ser analizadas en microscopio de barrido se determinaron diámetros hasta $320\mu\text{m}$.(Herrero Carrión, 2015)

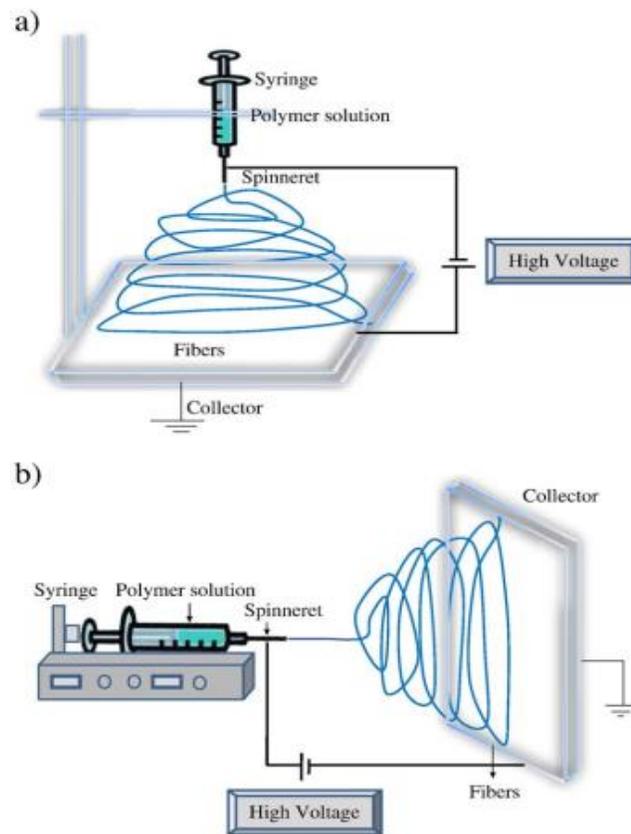
Torres M. Jonathan en su proyecto de grado "diseño de equipo de electrohilado por método de centrifugado para polímeros" menciona que el método de electrohilado por centrifugado permite implementar simultáneamente el campo eléctrico y la fuerza centrífuga para obtener un mayor volumen de producción de nanofibras en menor tiempo y bajo costo. Así que diseño una máquina de electrohilado por método de centrifugado que permite que a futuro se pueda realizar comparaciones con el método convencional por aguja. Para lograr el diseño definí los parámetros de funcionamiento del equipo, los componentes eléctricos y mecánicos de la máquina de electrohilado. Así mismo realizó la simulación del equipo para determinar la eficiencia en la obtención de fibras de diferentes polímeros. Concluyo de esta manera que los cálculos realizados durante el diseño permiten el correcto funcionamiento de los elementos y mecanismos, el control en la dosificación de la disolución polimérica que permiten obtener un diseño adecuado de las membranas poliméricas.(Torres Martínez, 2021)

2.2 Electrohilado

Electrospinning es una técnica de hilado que se centra en el uso de las fuerzas electrostáticas para producir fibras finas y de diámetros muy pequeños (desde nano a micrómetros) de soluciones poliméricas. Además, esta técnica necesita de voltaje de corriente directa (DC) en rangos de varias decenas de kV. Algunas técnicas como el electrohilado, se basan en el principio de fuerzas mutuas, son fuerzas repulsivas eléctricas aplicadas que superan las fuerzas de tensión superficial cargadas en la solución polimérica. Usualmente hay dos configuraciones estándar para el proceso de electrohilado vertical y

horizontal, las cuales se observan en la ilustración 1. Pero con los avances tecnológicos se han descubierto sistemas más sofisticados que permiten obtener estructuras de nanofibras más completas de manera más eficiente y controlada. El sistema de electrohilado radica básicamente de tres componentes primordiales una fuente de alto voltaje, un pezón hilador o aguja y un grupo de plato colector. Estos elementos están dispuestos en un cuarto a temperatura y condiciones atmosféricas adicionalmente, el cuarto debe estar ventilado por la formación de gases durante la evaporación del solvente usado durante el proceso y que pueden ser nocivos para el ser humano.(Bhardwaj & Kundu, 2010; Ruiz Silva, 2020)

Figura 1. Diagrama esquemático de la configuración de aparatos de electrohilado (a) disposición vertical y (b) disposición horizontal.



Fuente: (Bhardwaj & Kundu, 2010)

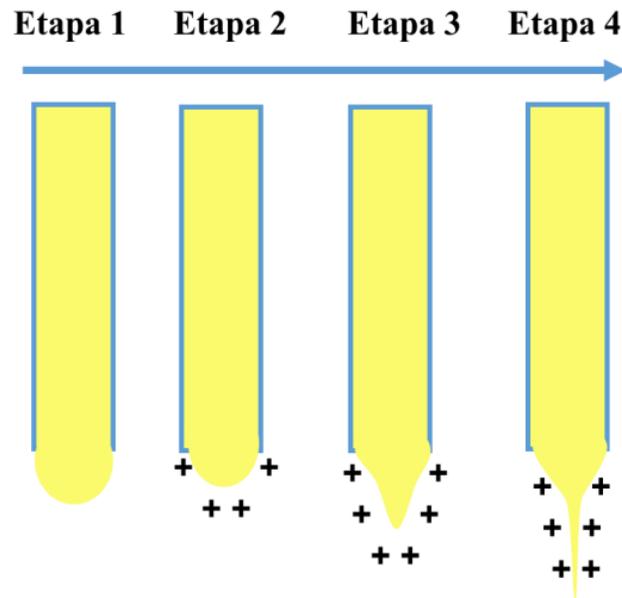
La fuente de alto voltaje se conecta en un extremo de sus salidas de tensión por una pinza con polaridad positiva al pezón hilador o aguja y a su vez una conexión de polaridad negativa al colector, cerrando así el circuito eléctrico. El fluido polimérico se introduce dentro del tubo capilar para electrohilado, la infusión de la solución polimérica es controlada por una bomba, el fluido es retenido por las fuerzas de tensión superficial al final del tubo capilar. Por lo que se debe someter a un campo eléctrico y está carga eléctrica induce en la superficie del fluido. Cuando el campo eléctrico aplicado logra el punto crítico, las fuerzas de repulsión superan las fuerzas de tensión superficial de la mezcla polimérica.

Eventualmente el hilo cargado de la solución es lanzado desde la punta del cono de Taylor y un inestable y rápido movimiento del hilo ocurre entre la punta de la aguja capilar y el colector permitiendo así la evaporación del solvente dando así la formación de fibras finas en el colector.(Bhardwaj & Kundu, 2010; Ruiz Silva, 2020)

2.3 Cono de Taylor

Geoffrey I. Taylor explicó la formación de meniscos electrificados cónicos (Bhardwaj & Kundu, 2010) que en honor a su nombre fueron nombrados conos de Taylor como se observa en la figura 2. Para formar un cono de Taylor en el proceso de electrohilado se basa, en dosificar muy lentamente una solución conductora a través de una aguja electrificada. Cambiando el caudal y la diferencia de potencial aplicados en la aguja, permiten vencer la tensión superficial, provocando una fuerza en sentido contrario a la contracción de la gota,(Ruiz Silva, 2020) así empieza a largarse por efecto de cargas y finalmente formar el cono inverso lo que induce a la formación de fibras.(Bhardwaj & Kundu, 2010; Ruiz Silva, 2020)

Figura 2. Representación de las etapas de formación del cono de Taylor en un equipo de electrohilado.



Fuente: (Velázquez de la Luz, 2021)

2.4 Parámetros que influyen en el proceso

En el proceso de electrohilado existen unas variables que influyen en las características físicas de las nano y microfibras a obtener, a continuación, se mencionan algunos parámetros que intervienen en el proceso.

2.4.1 Voltaje

El voltaje es uno de los parámetros más significativos involucrados dentro del proceso del electrohilado, al incrementar el voltaje permite un mayor estiramiento de la solución (Sánchez et al., 2013) debido a una mayor fuerza de Coulomb en el chorro y un fuerte campo eléctrico permitiendo obtener fibras de diámetros muy pequeños a su vez puede influir en la aparición de defectos (beads) del producto obtenido. Por ello es muy

importante analizar el voltaje en el comportamiento de cada polímero con su respectivo disolvente.(Sánchez et al., 2013)

2.4.2 Distancia entre la punta de la aguja y el colector

Al tener distancias largas se obtienen fibras con diámetro muy pequeños, pero a su vez podría ocasionar que las fibras se rompan por su propio peso, al tener distancias cortas se obtienen fibras con mayor diámetro, pero a su vez no tiene el tiempo necesario para que el disolvente se evapore llegando a obtener fibras húmedas y planas. Por esta razón se debe analizar una distancia adecuada de que se pueda adelgazar las fibras y a su vez permitir la evaporación del disolvente, dependiendo de las propiedades de la solución pueden tener o no efecto en la morfología de la fibra con la variación de la distancia.(Sánchez et al., 2013)

2.4.3 Flujo de salida

El flujo de salida determina el volumen mínimo para mantener un cono de Taylor estable y la cantidad de solución usada durante el proceso de electrohilado. Un flujo de salida bajo beneficia en dar el tiempo necesario para que el solvente se evapore y a su vez permite obtener fibras de menor diámetro y con pocos defectos.(Sánchez et al., 2013)

2.4.4 Colectores

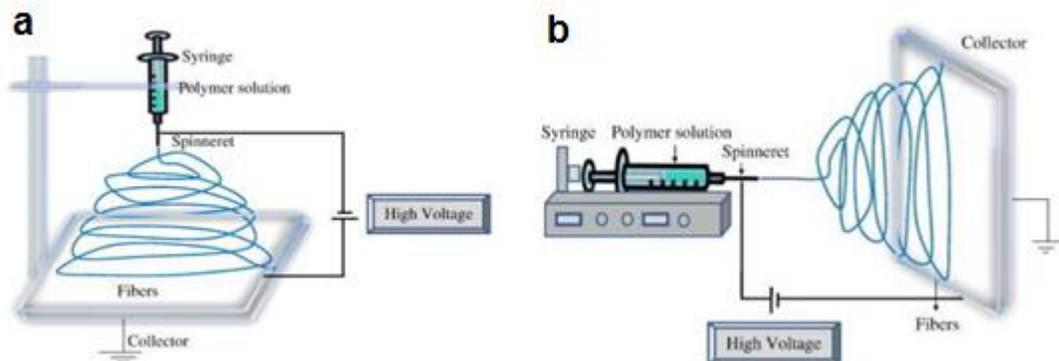
El colector es el elemento en el cual se depositan las nano y microfibras obtenidas durante el proceso de electrohilado, normalmente está hecho de aluminio o de algún otro tipo de metal. Este elemento se encuentra conectado a tierra de la fuente de alto de alto voltaje permitiendo la generación del campo eléctrico con la aguja. Dependiendo del tipo de

fibras a obtener se disponen de varios tipos y con distintas orientaciones. Los colectores más usados son colectores planos y colectores rotatorios cilíndricos.

1) *Colectores planos*

Estos colectores se caracterizan por su superficie totalmente plana en la cual se van a depositar las nano y microfibras obtenidas durante el proceso de electrohilado. Adicionalmente, algunos colectores pueden estar en movimiento aleatorio sobre su mismo eje y pueden estar orientados tanto horizontal como verticalmente y así poder formar membranas con características morfológicas diferentes ampliando así la aplicación. La disposición vertical tiene mayor desventaja por la posibilidad de caída de gotas de solución sobre el colector durante el inicio o finalización del proceso de electrohilado.

Figura 3. Diagrama esquemático montaje colector plano (a) disposición vertical y (b) disposición horizontal.

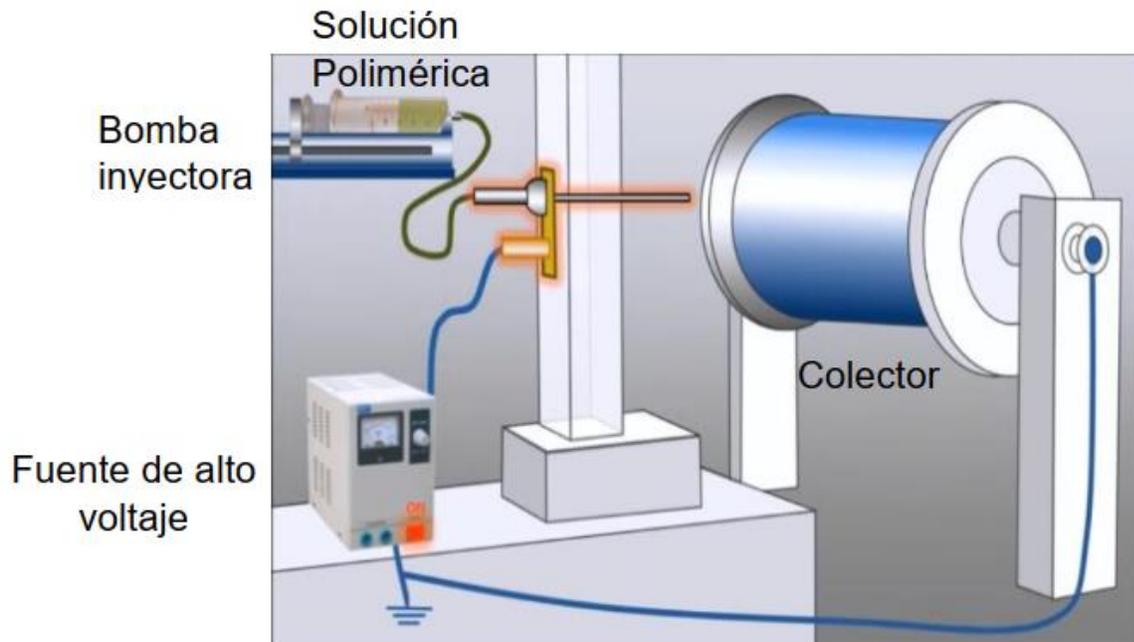


Fuente: (Herrero Carrión, 2015)

2) *Colectores rotatorios cilíndricos*

Consiste en rodar sobre su eje un colector en forma de cilindro (Herrero Carrión, 2015) por medio de un motor eléctrico, permitiendo que las fibras se alineen en la superficie rotatoria del colector.

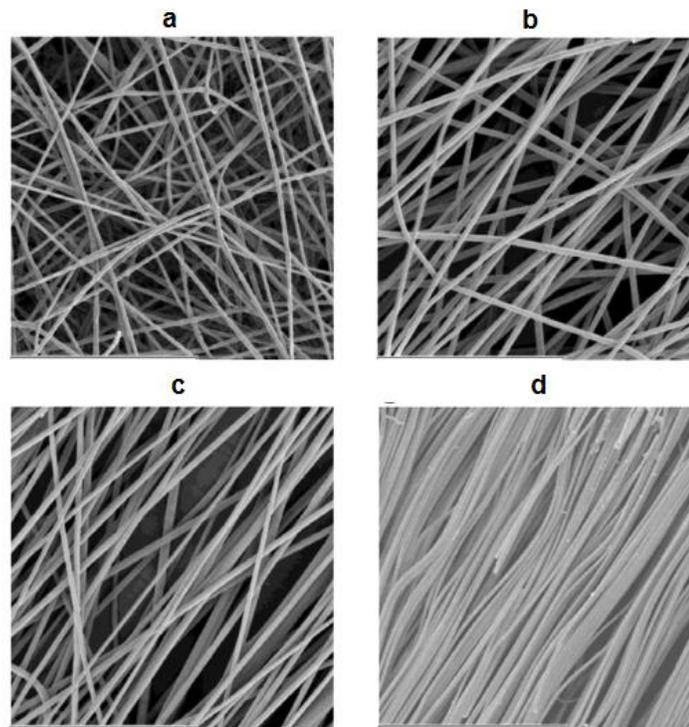
Figura 4. Montaje de electrohilado con colector cilíndrico rotatorio.



Fuente: (Velázquez de la Luz, 2021)

Según el estudio "evaluación de los parámetros que influyen en las características de la fibra de la membrana de poli (metacrilato de estilo) electrohilado." Se tomaron muestras de fibras (observar figura 5) obtenidas con velocidades de funcionamiento del colector cilíndrico entre 1200, 2500 y 3800 rpm respectivamente observando que a mayor velocidad de rotación del colector cilíndrico las fibras tienen mayor alineación.(Gómez-Tejedor et al., 2011)

Figura 5. (a) Imágenes SEM de fibras electrohiladas aleatoriamente orientadas; (b, c y d) Imágenes SEM de fibras electrohiladas alineadas obtenidas con un colector rotatorio con una velocidad de rotación de 1200, 2500 y 3800 rpm, respectivamente.



Fuente: (Gómez-Tejedor et al., 2011)

También, se observa que las particularidades mecánicas de las fibras alineadas cambian con respecto a las orientadas aleatoriamente. Teniendo un mayor esfuerzo a la ruptura las fibras alineadas (máximo Young 200MPa),(Gómez-Tejedor et al., 2011) que las fibras orientas aleatoriamente (módulo de Young 8.5MPa).(Gómez-Tejedor et al., 2011)

2.4.5 Diámetro interno de la aguja

El diámetro interno de ella aguja es muy importante para la inyección de la solución polimérica. Por lo que es fundamental seleccionar adecuadamente el diámetro interno para evitar la obstrucción en la extremo de la aguja lo que impide la inyección de la solución polimérica y también impedir la formación de defectos en la obtención de las fibras.

2.5 Parámetros ambientales

La humedad y la temperatura ambiental influyen en las características morfológicas de las fibras obtenidas durante el proceso de electrohilado. La humedad ambiental determina la velocidad de evaporación del solvente en la solución, así como las apariciones de poros circulares en la superficie de las fibras, estos orificios pueden promover una transferencia de proteínas y una migración celular mucho más ágil y fácil (Sánchez et al., 2013) en la ingeniería de tejidos. Por su parte la temperatura influye en la velocidad de evaporación y en la reducción de viscosidad de la solución.(Sánchez et al., 2013)

2.6 Parámetros que influyen en la solución

Los parámetros de una disolución polimérica influyen notablemente en el proceso de electrohilado para la obtención de nano y microfibras, en la tabla 2 se demuestra las propiedades que adquieren las fibras al disminuir o aumentar los parámetros.

2.6.1 Efecto de la concentración del polímero

La concentración del polímero determina la capacidad de formación de fibras mediante el proceso de electrohilado. (Herrero Carrión, 2015) Una concentración crítica es la concentración mínima de polímero en la mezcla para poder formar fibras. Al tener una concentración de polímero menor a la concentración crítica se obtendrán fibras con gotas y si la concentración de polímero va aumentando se van obteniendo fibras de mayor diámetro, pero al estar demasiado alta la concentración no se pueden formar fibras largas ni uniformes.(Herrero Carrión, 2015; Ruiz Silva, 2020)

2.6.2 Efecto peso molecular

El peso molecular del polímero juega un rol importante para determinar la concentración crítica del polímero y así lograr obtener fibras finas de polímero. El peso molecular del polímero tiene un valor mínimo o crítico que se produzca un jet uniforme durante el proceso de electrohilado al contrarrestar la tensión superficial de la solución polimérica. Si el peso molecular es demasiado bajo no se podrán formar nanofibras.(Herrero Carrión, 2015; Ruiz Silva, 2020)

2.6.3 Viscosidad

En el proceso de electrohilado, la viscosidad es una variable importante que permite determinar el tamaño y morfología de las fibras a obtener. Ya que el objetivo de esta variable es la de debilitar las fuerzas de estiramiento, que se genera en la repulsión electroestática del micro chorro cargado.(Ruiz Silva, 2020) Con una viscosidad demasiado baja no se pueden obtener fibras continuas y libres de gotas. Para aumentar la viscosidad de la solución se debe incrementar el peso molecular (Ruiz Silva, 2020) o agregar polieléctricos en pequeñas cantidades para no modificar la concentración de la solución polimérica.(Ruiz Silva, 2020) Si se aumenta demasiado la viscosidad dificulta la eyección del jet de la solución polimérica.(Herrero Carrión, 2015)

2.6.4 Conductividad de la disolución

Es un factor que determina el diámetro de las fibras a obtener ya que influye en la repulsión electroestática de las cargas superficiales (Ruiz Silva, 2020) que están presentes en la solución. Al tener una mayor conductividad se obtienen fibras de un menor diámetro, para aumentar la conductividad y por ende la fuerza eléctrica se pueden agregar sales en las

soluciones que permiten así obtener fibras más uniformes y sin formación de gotas.(Herrero Carrión, 2015; Molfino et al., 2020; Ruiz Silva, 2020)

2.6.5 Solvente

El solvente cumple dos funciones principales en el proceso de electrohilado, en primer lugar, permite diluir el polímero teniendo gran efecto en forma directa en la viscosidad, conductividad y tensión superficial de la solución facilitando el transporte del polímero desde la aguja hasta el colector. En segundo lugar, durante este recorrido el disolvente se evapora permitiendo así la formación de fibras sólidas en el colector. Es por esto que la selección del solvente y sus propiedades cumplen un papel importante en el proceso de electrohilado, por ejemplo, la buena propiedad dieléctrica del solvente reduce la formación de gotas y la obtención de fibras de menor diámetro. En la tabla 1 se describen propiedades de diferentes solventes usados en el proceso de electrohilado.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

Tabla 1. Propiedades de diferentes solventes usados en el proceso de electrohilado.

Solvente	Tensión superficial (mN/m)	Constante dieléctrica	Punto de ebullición (°C)	Densidad (g/ml)
Cloroformo	26.5	4.8	61.6	1.498
Dimetilformamida	37.1	38.3	153	0.994
Hexafluoro isopropanol	16.1	16.7	58.2	1.596
Tetrahidrofurano	26.4	7.5	66	0.886
Trifluoro etanol	21.1	27	78	1.393
Acetona	25.2	21	56.1	0.786
Agua	72.8	80	100	1.000
Metanol	22.3	33	64.5	0.791
Ácido acético	26.9	6.2	118.1	1.049
Acido fórmico	37	58	100	1.21
Dicloro metano	27.2	9.1	40	1.326
Etanol	21.9	24	78.3	0.789
Ácido trifluoroacético	13.5	8.4	72.4	1.525

Fuente:(Bhardwaj & Kundu, 2010)

2.6.6 Tensión superficial

La tensión superficial de la disolución es la fuerza principal que se debe vencer para lograr el estiramiento del micro chorro y producir las fibras. Con una mayor tensión superficial de la solución se requiere aplicar una mayor tensión en el proceso de electrohilado. La tensión superficial de la solución se determina por medio del solvente sin embargo también se determina por las propiedades y concentración química del polímero, concluyendo así que al incrementar la solución polimérica disminuye la tensión superficial.(Ruiz Silva, 2020)

Tabla 2. Parámetros con sus respectivas características.

Parámetro		Característica que aporta
Concentración de la solución de polímero	↑	Dificulta el paso de la solución a través del capilar.
	↓	Las fibras se rompen en gotas antes de llegar al plato colector.
Tensión Superficial	↑	Aparición de defectos (beads) en las fibras.
	↓	Obtención de fibras lisas, para disminuir la tensión superficial se pueden adicionar solventes con baja tensión como el etanol.
Conductividad de la solución	↑	Mayor transporte de cargas, mayor estiramiento de la solución, fibras más delgadas.
	↓	Menor transporte de cargas, menor estiramiento de la solución, fibras más gruesas.
Voltaje	↑	Fibras gruesas, distorsión del jet, aparición de beads.
	↓	Poco impulso para llegada de la solución al plato colector.

Flujo de Salida	↑	Fibras más gruesas, beads con mayores tamaños.
	↓	Mayor tiempo para evaporación del solvente, fibras sin defectos.
Distancia aguja colector	↑	Las fibras pueden romperse debido a su propio peso. Mayor estiramiento de la solución , obtención de fibras delgadas.
	↑↑	Aparición de defectos (beads)en las fibras al trabajar con muy altas o muy bajas distancias.
	↓↓	
	↓	Poco tiempo para la evaporación del solvente, por tanto, las fibras llegan húmedas al plato colector.
Humedad Relativa	↑	Aparición de poros en las nanofibras.

Fuente: (Sánchez et al., 2013)

2.7 Membranas poliméricas

La obtención de membranas de nanofibras producidas a través del proceso de electrohilado actualmente son muy aplicadas en diferentes áreas como lo es en la biomédica donde una de sus tantas aplicaciones es la creación de membranas de nanofibras con propiedades específicas las cuales cumplen un trabajo determinado, como por ejemplo lo es la aplicación de la membrana con tejido entrecruzado de fibras generadas por el método de electrohilado, la cual se usa normalmente para la encapsulación de enzimas, dicha membrana evita la disolución de estas al estar en contacto con agua y mantiene la enzima en perfecto estado.

Las características que se quieran obtener de las membranas están directamente atadas a la disposición o configuración inicial de la máquina, antes de iniciar con el proceso de electrohilado se deben tener claras y definidas las configuraciones o valores con los

cuales se realizara el proceso, estos valores de configuración son: la velocidad de dosificación, la distancia entre aguja – colector, el voltaje a aplicarse, la velocidad de giro del colector, la temperatura del ambiente y la humedad, estos últimos dos aunque parezcan irrelevantes juegan un papel importante en los resultados que se esperan obtener y la calidad de la membrana.(Cabrera et al., 2019)

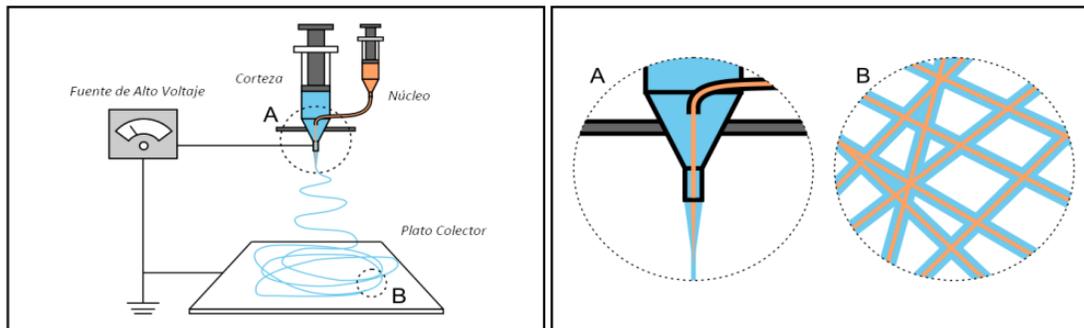
2.8 Otras técnicas de electrohilado

Existen varios métodos para la obtención de nano y microfibras, a continuación, se mencionan algunos de los métodos más utilizados.

2.8.1 Electrospinning coaxial

El electrohilado coaxial es una técnica que se fundamenta en el mismo principio de funcionamiento del electrohilado convencional. La variación de la técnica de electrohilado coaxial con respecto al electrohilado convencional es la utilización de dos boquillas situada una boquilla dentro de otra aún más grande permitiendo así durante el proceso la formación de nano y microfibras con una estructura de núcleo y cubierta de polímeros diferentes o la formación de fibras con un núcleo hueco al utilizar un material solvente que se pueda evaporar durante el proceso de electrohilado.(Herrero Carrión, 2015; Sánchez et al., 2013)

Figura 6. Electrospinning coaxial.



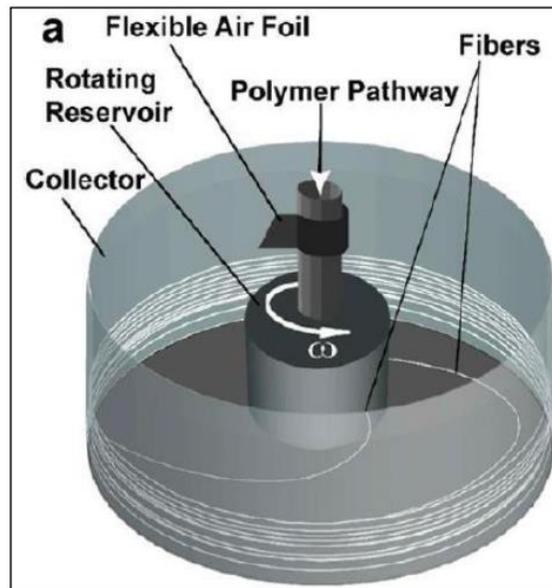
Fuente: (Sánchez et al., 2013)

La mayor ventaja de este proceso es que la solución que forma el núcleo no obligatoriamente debe tener propiedades dieléctricas para someterse al proceso,(Sánchez et al., 2013) sino que la solución que sirve de corteza adicionalmente, sirve como medio de transporte permitiendo así el encapsulamiento de fármacos.(Sánchez et al., 2013)

2.8.2 *Forcespinning o electrohilado por centrifugado*

El método de Forcespinning permite obtener fibras por medio del uso de fuerzas centrífugas en lugar de fuerzas electrostáticas es decir que no es necesario el uso de una fuente de alto voltaje para la formación del campo eléctrico. Esta técnica permite la formación de nanofibras a partir de una mayor cantidad de materiales fundidos y soluciones poliméricos.

Figura 7. Método Forcespinning.



Fuente: (Torres Martínez, 2021)

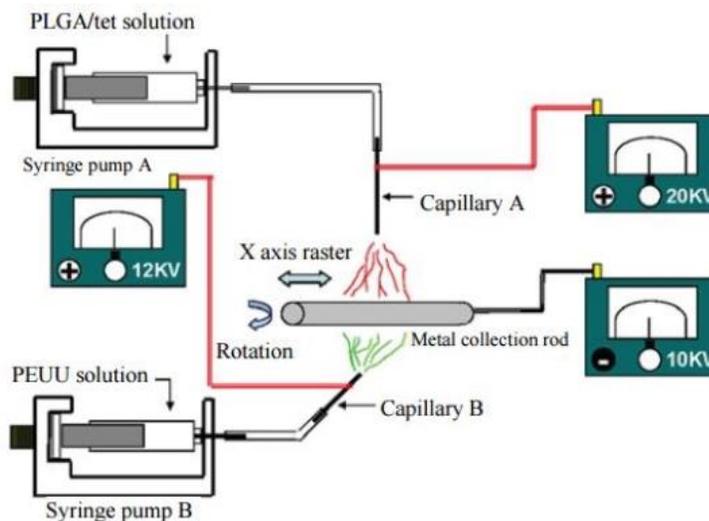
El proceso de Forcespinning consiste en la acción compuesta de las fuerzas centrífugas y la temperatura. El material se encuentra en una cámara que posee unos orificios (spinnerets), el material a usar se debe estar en estado líquido dentro de la cámara, luego se hace rotar la cámara y las fuerzas centrífugas generadas, provoca la salida del material por los orificios en forma de fibras los cuales se van depositando en el colector. En este proceso es muy importante controlar la temperatura de los materiales fundidos y a su vez la viscosidad que permita la salida del material por los orificios. Y se debe controlar la distancia entre los orificios y el colector en soluciones poliméricas para permitir la evaporación del solvente. (Herrero Carrión, 2015)

Las ventajas de este proceso son menores costos, mayor producción, amplia gama de procesamiento de materiales y menor efecto nocivo por abolir el uso de disolventes durante el proceso en caso de materiales fundidos. (Sánchez et al., 2013)

2.8.3 *Electrospinning con doble componente o doble inyección*

Es un proceso que permite electrohilar dos polímeros en un solo colector, promoviendo la obtención de membranas con superiores propiedades. Cada inyector puede tener un diferente flujo de inyección, como una variación en el campo eléctrico ya que se puede implementar una fuente de alto voltaje independiente en cada inyector y las fibras obtenidas durante este proceso se pueden emplear en vendaje de heridas. (Sánchez et al., 2013; Torres Martínez, 2021)

Figura 8. Diagrama proceso de electrohilado de doble flujo.



Fuente: (Torres Martínez, 2021)

2.9 Aplicaciones de proceso de electrohilado

Las fibras y esteras electrohilado tiene varias aplicaciones ya que brindan grandes ventajas como alta relación superficie volumen, alta porosidad y mayores propiedades físico-mecánicas, ya que en la manipulación de los diversos parámetros del proceso y de la solución polimérica se pueden obtener fibras con diferentes características morfológicas, propiedades físicas y mecánicas. El proceso de electrohilado es un método muy versátil ya

que las fibras se pueden hilar en cualquier forma utilizando una amplia gama de polímeros.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

2.9.1 Aplicaciones en el área biomédica de las nanofibras

Las nano y microfibras obtenidas durante el proceso de electrohilado tienen un amplio rango de aplicación en el área biomédica combinando los fundamentos de la ingeniería y las ciencias de la vida en la restauración, mantenimiento y mejora de la función de los tejidos, también como sustitutos biológicos.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

En la ingeniería de tejidos los biomateriales juegan un papel muy importante al recurrir como matrices en el crecimiento celular, proliferación y formación de nuevos tejidos en tres dimensiones.(Bhardwaj & Kundu, 2010) Sin embargo, el uso de la nanofibras es necesarios tener en cuenta varios aspectos la selección del material (biodegradable o no biodegradable, pero lo más importante que sea biocompatible), (Robles-García et al., 2014) la porosidad, modificación de la superficie, orientación de las fibras y el tejido en el cual se usará.(Robles-García et al., 2014)

Los andamios biodegradables usados en ingeniería de tejidos son elementos indispensables usados como plantillas para la siembra, proliferación, invasión y diferenciación celular, antes de la regeneración del tejido biológicamente funcional. Promoviendo positivamente en las interacciones célula-matriz y célula-célula y demostrando eficacia como sustrato para el crecimiento celular. Estos andamios biodegradables se usan en ingeniería de tejidos tales como cartílagos, tejidos dérmicos, huesos, vasos sanguíneos arteriales, tejidos del corazón, nervios, etc.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

Para la cicatrización de heridas se usan apósitos que puedan cumplir con las siguientes características: capacidad hemostática, eficacia como barrera bacteriana, capacidad de absorción de excesos de líquidos de herida, transmisión de vapor de agua adecuada, capacidad de intercambio gaseoso adecuado, capacidad de adaptarse al contorno de la herida, adherente al tejido sano y inhaciente al tejido de la herida, indoloro y fácil de retirar. Los materiales electrohilados cumplen con la mayoría de requisitos descritos ya que las estructuras de las nano y microfibras proporcionan propiedades deseables. Aunque el uso de apósitos médicos aún está en investigación, se han hecho experimentos en ratones con el uso de colágeno tipo I encontraron que la cicatrización de heridas con nanofibras fue mejor que con el cuidado convencional, especialmente en las primeras etapas de cicatrización.(Bhardwaj & Kundu, 2010) Las fibras de seda y poliuretano también se usan en vendajes para heridas.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

En la entrega de medicamentos con el uso de matrices de administración biocompatible de polímeros, se controla la liberación del fármaco a una velocidad definida en un periodo de tiempo definido. Las esteras de nanofibras se han aplicado en transporte de fármacos debido a sus altas características funcionales, basados en el principio de disolución del fármaco en partículas aumenta con el aumento del área superficial tanto del fármaco como del transportador. Dependiendo del polímero utilizado, la liberación de la dosis farmacéutica se puede diseñar rápida, inmediata y retardada.(Bhardwaj & Kundu, 2010) son comúnmente usadas en el tratamiento de enfermedades por ejemplo, el cáncer con aplicación en dos áreas primero en el desarrollo de nanoconectores (nanopartículas que se les pueden agregar fármacos o agentes de formación de imágenes) (Robles-García et al., 2014)

dirigiéndolos a los tumores. Segundo en la elaboración de nanosensores de alto rendimiento en la detección de huellas biológicas de cáncer.(Robles-García et al., 2014)

Varios investigadores han logrado encapsular con éxito fármaco dentro de fibras electrohiladas mezclando los fármacos con la solución polimérica. Se han electrohilado una variedad de fármacos de bajo peso molecular como ibuprofeno, cefazolina, itraconazol, medicina y clorhidrato de tetraciclina.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

2.9.2 Aplicaciones en el área alimenticia de las nanofibras

El uso de nanopartículas en el área alimenticia tiene un amplio campo de acción, usado en la mejora de suplementos, envases alimenticios, colorantes, saborizantes y aumento en la gama de texturas. Siempre, teniendo en cuenta uno de los aspectos más importantes que es la seguridad alimentaria. Mediante el uso de estas técnicas de electrohilado permite la protección de la degradación de nutrientes, antioxidantes y otras moléculas bioactivas de los alimentos durante la elaboración y almacenamiento. (Robles-García et al., 2014) En limonadas, jugos de frutas y en otras bebidas se han incorporado vitaminas y otros nutrientes en nanopartículas, incrementando de esta manera la biodisponibilidad de estos nutrientes en el cuerpo humano.(Robles-García et al., 2014)

Las nanofibras también se han usado en recubrimientos y películas comestibles con el fin de que actúen como barreras de humedad, de lípidos, gases y prevenir la entrada de aromas adicionalmente permite una mayor conservación de una gran variedad de alimentos como lo son frutas, carnes, verduras, productos de panadería, dulces y papas fritas. Así mismo, se han desarrollado nanosensores que permiten detectar la presencia de microorganismos patógenos y mico toxinas presentes en los alimentos en cualquier etapa de

producción y almacenamiento con la finalidad de garantizar que los alimentos que se consuman no causen daño en la salud de las personas que los consuman. También se han incorporado diferentes niveles de nanopartículas de plata en alimentos para pollos, aumentando considerablemente el peso de estas aves y en cultivo de plantas comestibles se usan nanopartículas que aumentan la germinación de las semillas y por ende la producción de estas plantas. La aplicación de nanopartículas en alimentos se encuentra en constante desarrollo en varias investigaciones y éstas podrían permitir el consumo de alimentos más saludables, resistentes y de mayor durabilidad.(Robles-García et al., 2014)

2.9.3 Aplicaciones en el área textil de las nanofibras

Por el crecimiento de microorganismos especialmente por factores de humedad, temperatura adecuados, polvo, comida y bebida derramados, secreción, sudor y los materiales de fabricación de los textiles que están en contacto con el cuerpo humano. Puede provocar la degradación y deterioro de las fibras, (Robles-García et al., 2014) olores indeseables y riesgo a la salud humana. Por esta razón se han realizado investigaciones para reducir y prevenir el crecimiento de estos microorganismos, la aplicación de nanofibras inorgánicas y sus nanocompuestos son una buena alternativa en la industria textil. Donde las propiedades físicas y químicas de los materiales mejoran la calidad de los productos. Un ejemplo, es el uso de nanofibras de dióxido de titanio (TiO_2) debido a que poseen propiedades aplicadas en la auto limpieza, agentes antibacterianos y protectores de rayos ultravioleta. (Robles-García et al., 2014) También se han elaborado nanofibras de poliamida 6 con óxido de zinc (ZnO) y propileo con ZnO con el objetivo de inhibir el crecimiento bacteriano en la superficie de los textiles.(Robles-García et al., 2014)

Otra aplicación de las nanopartículas ha sido a través de la elaboración de hilos de nanofibras, por medio de la técnica de electrohilado con la finalidad de aumentar la resistencia y así formar materiales usados en la fabricación de ropa de protección. Además, se han elaborado nanofibras de poliuretano para ser incorporados en los tejidos y así proteger la ropa de penetración de líquidos. Por otra parte, se han incorporado nanopartículas de sílice con un colorante termo crómico para producir diversos colores, detectar cambios ambientales y protección a rayos ultravioleta.(Robles-García et al., 2014)

2.9.4 Otras aplicaciones de las nanofibras

Filtración el electrohilado proporciona soluciones de eliminación de partículas nocivas en rangos de submicras. Las partículas diminutas menores de 0.5mm pueden quedar atrapadas muy fácilmente en filtros estructurados de nanofibras electrohiladas debido a una alta relación área superficial/volumen y alta cohesión superficial resultante. Las membranas de nanofibras muestran una eliminación extremadamente efectiva de partículas en el aire entre 1 a 5 nanómetros no sólo por atrapamiento físico sino también por captura electrocinética en el filtro de aire.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

Aplicaciones en generación de energía las membranas poliméricas conductoras también tienen potencial para aplicaciones como disipación electrostática, protección a la corrosión, blindaje en interferencia electromagnética, dispositivos fotovoltaicos, fabricación de diminutos dispositivos como sensores y actuadores. Las membranas de nanofibras conductoras también son bastante adecuadas en el uso de electrodos porosos desarrollados en baterías y celdas de combustible.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

En cosméticos las nanofibras poliméricas también pueden ser usadas con o sin varios aditivos como mascarilla cosmética para el cuidado de la piel u otras propiedades terapéuticas y médicas. Las membranas nanofibras electrohiladas facilitan una mejor utilización y aceleran una mejor transferencia de aditivos a la piel.(Bhardwaj & Kundu, 2010)

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1 Materiales

3.1.1 *Ácido Poliláctico PLA*

El ácido poli láctico PLA es un poliéster termoplástico que forma parte de los a-hidroxiácidos; (C et al., 2003) su precursor es el ácido láctico, es una molécula que existe bajo 4 formas: L, D, meso y racémica. El PLA se produce por la polimerización del ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico, CH₃-CHOH-COOH) (C et al., 2003) de alta pureza, que contiene un átomo de carbono asimétrico y es el hidroxiácido más sencillo que existe.(C et al., 2003) Son dos isómeros ópticos el D(-) láctico y L(+) láctico, la configuración L(+) es metabolizada por el ser humano y se encuentra este mismo ácido en la sangre.(C et al., 2003)

En lo anteriormente mencionado el PLA se caracteriza por tener propiedades físicas y mecánicas, farmacéuticas y de reabsorción (C et al., 2003) dependiendo de la composición química y peso molecular,(C et al., 2003) adicionalmente, el PLA tiene propiedades mecánicas muy similares a otros polímeros, lo cual amplía el rango de aplicaciones en la industria de alimentos, como material de empaque de bebidas, productos secos donde cumplen la función de barrera a la humedad, luz, grasas y gases.(C et al., 2003)

Tabla 3. propiedades del PLA.

Masa Molecular (Kda)	% Cristalinidad	Viscosidad h (dL/g)	Densidad r (g/cm³)
L-P.L.A. 50 a 756	15 a 74	0,61 a 8,2	1,25
D.L. P.L.A. 21 a 550	0 (amorfo)	0,25 a 2,01	1,29
P.L.A.-P.G.A. 20 a 145	46 a 52	0,5 a 1,6	1,50 a 1,64

Fuente: (C et al., 2003)

En aplicaciones médicas se utilizan para la creación de matrices en la generación guiada de tejidos. También se usa en la aplicación de quimioterapia anticancerígena y en micro y nano encapsulamiento de medicamentos de liberación lenta.(C et al., 2003)

3.1.2 Motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V)

El motoreductor de 4kg*cm es un dispositivo que consta de un motor eléctrico de corriente directa y un conjunto de engranajes metálicos. El motor eléctrico está diseñado para ser alimentado con 12V, pero puede estar alimentado desde 3 hasta 12 voltios sin afectar el buen rendimiento y funcionamiento del motor. El conjunto de engranajes metálicos permite disponer de una relación de 150:1, favoreciendo de esta manera un torque de 4kg*cm y entrega una velocidad angular de 100rpm con consumos de corriente relativamente muy bajos.(Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

Figura 9. Motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V)



Fuente: (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

Tabla 4. Características principales motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V)

Voltaje de operación	3V a 12V
Consumo de corriente sin carga	90 mA
Consumo de corriente con carga	1200 mA Aproximadamente
Torque	4 Kg*cm

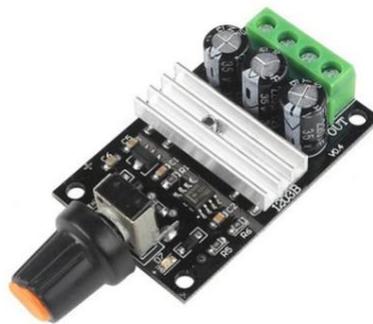
Relación	150:1
Velocidad	100 RPM

Fuente: (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

3.1.3 Módulo PWM variador de velocidad motores DC 6V~28V (3A)

El módulo PWM Variador de Velocidad Motores DC 6V~28V (3A) que se muestra en la figura 9. Es un dispositivo que permite variar la velocidad de motores de corriente directa (DC) por medio de la técnica PWM (modulación por ancho de pulso). El dispositivo se conecta a la entrada una fuente de voltaje DC de 6 a 28V, teniendo en cuenta que la tensión seleccionada será la tensión aplicada al motor. A la salida del módulo se conecta el motor de corriente continua. Con estas conexiones ya definidas se puede controlar la velocidad del motor por medio del potenciómetro. (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

Figura 10. Módulo PWM variador de velocidad Motores DC 6V~28V.



Fuente: (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

Tabla 5. Características Modulo PWM variador de velocidad motores DC 6V~28V.

Voltaje de entrada DC	6 a 28V
Corriente máxima de salida	3A
Potencia máxima de salida	80W
Ciclo de trabajo ajustable	5% a 100%
Dimensiones	32mm*50mm*15mm

Fuente: (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

3.1.4 Fuente conmutada de voltaje 12V - 10A - 120W DC

La fuente conmutada de voltaje está diseñada para una gran variedad de proyectos, que demanden una fuente de alimentación cuyo voltaje de salida sea de 12 voltios y una corriente máxima de 10A. Este dispositivo permite ser conectado a una fuente de entrada 100 a 240 voltios corriente alterna con una frecuencia de 50 a 60 Hz. La fuente de alimentación puede estar en funcionamiento las 24 horas con una corriente nominal de la fuente de voltaje no exceda el 80% de la corriente máxima y así evitar sobrecalentamiento del dispositivo.(Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

Figura 11. Fuente Conmutada de Voltaje 12V - 10A - 120W DC



Fuente: (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

Tabla 6. Características principales Fuente Conmutada de Voltaje 12V - 10A - 120W DC

Modelo	S-120-12
Fuente de voltaje salida	12VDC / 10A
Voltaje de entrada	100VAC ~ 240VAC
Frecuencia de entrada	50 Hz / 60 Hz
Protección	Corto circuito y sobrecargas
Temperatura de funcionamiento	-10 °C ~ 50 °C
Humedad relativa de funcionamiento	20% ~ 90%

Fuente: (Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos, s. f.)

2.1.5 Mini Sw Interruptor de Codillo 6 Pines - 3 Posiciones

El mini Sw interruptor de codillo 6 pines - 3 posiciones (ON-OFF-ON) es muy usado en circuitos eléctricos y electrónicos, ya que Sw de palanca de 3 estados con 6 pines de encendido, apagado y encendido, permite cambiar el giro de rotación de motores eléctricos, cambios de posición y de dirección del flujo de corriente en elementos eléctricos.

Figura 12. Mini Sw interruptor de codillo 6 pines - 3 posiciones



Fuente: (*Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos*, s. f.)

Tabla 7. características principales mini Sw interruptor de codillo 3 pines - 2 posiciones

Swiche tipo codillo	6 pines - 3 posiciones
Voltaje máximo de operación	125 Voltios AC
Corriente máximo de operación	6A
Longitud del terminal	10mm
Separación entre pines	5mm*6,3mm
Dimensiones del mando	Base: 2.6mm, Punta: 3mm, Altura: 10mm
Dimensiones del Swiche	13mm x 12,8mm x 34mm
Posiciones	ON-OFF-ON

Fuente: (*Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos*, s. f.)

3.1.6 Aleación de aluminio

La aleación de aluminio serie 3000 (aluminio-manganeso) es un tipo de aleación inoxidable de alta resistencia y resistencia al calor, además tiene alta conductividad térmica y eléctrica. El grado de esta serie de aluminio más usado para la fabricación de latas de

cerveza es la aleación aluminio 3004. Esta aleación de aluminio se caracteriza por tener buena confortabilidad, soldabilidad, y resistencia a la corrosión. Es el aluminio más usado a prueba de herrumbre (capa de color rojizo que se forma en la superficie de algunos metales). (Bobina, s. f.) El procesamiento en frío es el ideal para mejorar las propiedades mecánicas de esta aleación. Además de latas de cerveza, también es usado en la fabricación de utensilios de cocina, dispositivos de manipulación, almacenamiento de alimentos y productos químicos, materiales de construcción, piezas de lámparas y linternas, etc. En la tabla 6 se especifica la composición química de esta aleación de aluminio. (Bobina, s. f.)

Tabla 8. Composición química del metal de aluminio de aleación 3004.

Aleación	Si	Fe	Cu	Minnesota	Mg	Zn	Otros	Otros total	Al: min.
3004	0,3	0,7	0,25	1,0-1,5	0,8-1,3	0,25	0,05	0,15	Recordatorio

Fuente: (Proveedor y fabricantes de láminas de aluminio 3004 con precio bajo - Tigers Aluminium, s. f.)

Tabla 9. Datos físicos del metal de aluminio de aleación 3004.

Densidad (lb/pulgadas cúbicas)	0.098
Gravedad específica	2.72
Punto de fusión (grados F)	1170
Módulo de tensión de elasticidad	10
Módulo de torsión de elasticidad	3.8

Fuente: (Proveedor y fabricantes de láminas de aluminio 3004 con precio bajo - Tigers Aluminium, s. f.)

3.1.7 Jeringas

Las jeringas son dispositivos utilizados principalmente por profesionales en la salud, debido a que este elemento es usado para dosificar sustancias líquidas en cantidades controladas (volumen específico) además, Son fábricas de material inerte debido a que no debe causar alteraciones que cambien la naturaleza tanto de la jeringa como del líquido a dosificar. Las jeringas se componen de un pivote o punta que es el lugar donde se conecta

la aguja, un cuerpo de forma cilíndrica redonda en el que se va a encontrar el fluido, un embolo hecho de material de goma que permite sellar y empujar la sustancia a través de un vástago. Generalmente se encuentran de diferentes tamaños y capacidad que van desde los 0,5 a 60mL (mililitros), las jeringas se clasifican en dos tipos Luer lock y Luer slip que es el tipo de diseño que tiene la punta en la que se va a colocar la aguja. La jeringa Luer lock presenta en la punta una rosca doble que permite asegurar y dificultar el desprendimiento de la aguja durante el procedimiento de inyección de la sustancia líquida. La jeringa Luer slip o de punta bicuda (cónica) tiene un diseño que permite fijar mediante fricción el encaje de la aguja. (*Jeringas y agujas / Fisher Scientific, s. f.*)

Figura 13. Jeringa desechable



Fuente: *Fisher Scientific, s. f.*

3.1.8 *Agujas de jeringas*

Generalmente fabricadas en acero inoxidable, que incluye un soporte el cual será ubicado en la punta de la jeringa. La punta es biselada con una superficie uniforme libre de marcas y deformidades. Las agujas se diferencian principalmente por su longitud y diámetro el cual se mide por su calibre, si tiene un mayor calibre se tendrá un diámetro de aguja más reducido. (*Jeringas y agujas / Fisher Scientific, s. f.*)

Figura 14. Aguja desechable



Fuente: *Fisher Scientific*, s. f.

3.1.9 Rodamiento F688ZZ

Son rodamientos fabricados por medio de un anillo interno y externo que contiene un juego de bolas radiales de precisión que permite operar a altas velocidades reduciendo considerablemente la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este por medio de rodadura (*Rodamiento F688ZZ*, s. f.) facilitando un fácil desplazamiento. Son especialmente usados en maquinaria de proyectos de electrónica, CNC Ruteadora, impresora 3D, (*Rodamiento F688ZZ*, s. f.) etc. Debido a sus características y facilidades de trabajo. (*Rodamiento F688ZZ*, s. f.)

Figura 15. Rodamiento F688ZZ



Fuente: (*Rodamiento F688ZZ*, s. f.)

Tabla 10. Rodamiento F688ZZ

Material	Acero cromado
Capacidad de carga dinámica Cr(N)	1252
Capacidad de carga estática Cor(N)	592
Máximas revoluciones (RPM)	Grasa: 36000 Aceite: 43000
Dimensiones	D: 16 mm d: 8 mm D1: 18 mm B: 5 mm B1: 1.1 mm

Fuente: (*Rodamiento F688ZZ*, s. f.)

3.1.10 Acrílico

El acrílico es el polímero metil metacrilato PMMA, es un termoplástico que en su estado natural es incoloro (transparente), pero se puede adicionar pigmentos para así obtener una gran variedad de colores de láminas. Es un plástico de ingeniería considerado como el mejor de todos los plásticos transparentes usados a la intemperie, comúnmente es usado en mercados de cubiertas, publicidad, decoración, avisos luminosos, etc. Por medio de láminas obtenidas mediante diversos procesos como extracción, colado o fundición hueca.(Coca, s. f.; R, 2021)

3) *Propiedades físicas y químicas del acrílico*

- Tiene una transparencia mayor que la del vidrio con un valor de transmisión de luz de 92-95%.

- Es muy liviano con una densidad de 1,2 g/cm³.(R, 2021)

- Excelente resistencia a la degradación por rayos ultravioleta y al medio ambiente.

- Larga vida útil.

- Tiene baja resistencia a la abrasión (desgaste superficial).
- Es de fácil limpieza, se puede limpiar con utensilios domésticos como detergente y agua.
- Tiene una gran facilidad al termo formado sometiéndolo a temperaturas entre 140 a 180°C.
- Tiene una temperatura continua de servicio que esta entre -45 a 90°C.
- Tiene buenas propiedades aislantes al poseer resistencia al paso de corriente.
- Es 10 a 20 veces más resistente al impacto que el vidrio.(R, 2021)
- Es resistente a sustancias químicas a diversos hidrocarburos, ácidos, y óxidos. No se recomienda el uso en hidrocarburos aromáticos y clorados, ni con disolventes orgánicos y acetonas.(R, 2021)

3.1.11 Filamento de Tereftalato de polietileno con glycol (PETG)

El PETG es uno de los materiales más usados para la impresión en 3d. Es una variante del PET presentando un cambio en la estructura química del polímero. Modificando así las propiedades físicas haciéndolo más transparente, menos frágil y más fácil de procesar que el PET común. (Trapero, 2017) Ya que ofrece una resistencia y resiste más temperatura que el PLA. El PETG tiene mayor facilidad de impresión en 3d que el ABS aportando así muy buenas propiedades mecánicas. Con respecto a la rigidez el PETG es un material más elástico y menos frágil que el PLA y es menos rígido que el ABS. En cuanto a la resistencia permite resistir más golpes y esfuerzos que el PLA y el ABS haciéndolo, así como el material

ideal en la fabricación de piezas mecánicas que requieran un mayor esfuerzo. Continuando con la resistencia a la temperatura el PETG se empieza a ablandar a los 80 °C y puede resistir bajas temperaturas en tiempos prolongados. Este material se puede usar en área alimenticia ya que cuenta con la aprobación de la FDA (agencia estadounidense que regula los alimentos, medicamentos y cosméticos). (Trapero, 2017) Además, algunas de las otras ventajas es que es muy estable y resistente químicamente a ácidos y bases, es inodoro al imprimirse y es un material que se puede reciclar junto con las botellas de PET. (Trapero, 2017)

El filamento de PETG suele imprimirse entre 220 a 250°C. Se recomienda usar una superficie de impresión a una temperatura de 60 a 90 °C y el uso de ventilador para mejorar la calidad de las piezas. En la tabla se describen algunas propiedades físicas y mecánicas del PETG con respecto al PLA.(abax3d, 2020)

Tabla 11. Propiedades físicas y mecánicas del PETG con respecto al PLA.

Propiedad	PLA	PETG
Densidad (g/cm ³)	1.24	1.27
Resistencia a tracción (MPa)	3309	50
Resistencia a flexión (kg/cm ²)	485	700
Resistencia al impacto (KJ/m ²)	20	105
Temperatura de deformación (°C)	55	85
Resistencia UVA y humedad	Muy baja	Buena
Reciclabilidad	Buena	Buena
Ópticas	Exactitud en el color	Trasparencia

Fuente: (abax3d, 2020)

3.2 Equipos

3.2.1 Impresora 3D Creality Ender 3

La impresora 3D Creality Ender 3 es un equipo capaz de imprimir en 3 dimensiones lo que quiere decir que los objetos a imprimir tendrán volumen. Este dispositivo puede

funcionar con diversos materiales inyectando polímeros como el PLA, ABS, PETG. Para el funcionamiento es necesario facilitar al equipo un archivo de tipo CAD en el cual se encuentra el dueño para imprimir. Generalmente, disponen de una pantalla, lector SD o USB con el archivo, se continua con la selección del modelo y dará inicio al proceso de impresión que consiste en fundir filamentos de material que van construyendo finas capas que se van depositando unas encima de otras hasta construir el objeto diseñado. Con respecto al tiempo de impresión no son tan rápidas como las impresoras láser y pueden llevar horas para imprimir pequeños objetos dependiendo de la calidad y volumen del elemento a imprimir.

Figura 16. Impresora 3D Creality Ender 3



Fuente: («Creality Ender 3», s. f.)

Pero aun así tienen un muy amplio rango de aplicaciones por ejemplo en el campo de la medicina se pueden imprimir a un bajo costo y casi de inmediato todo tipo de prótesis, piezas de diseño arquitectónico, decoración, etc.. («Creality Ender 3», s. f.) A continuación, se describen las principales características e información técnica de la impresora 3D Creality Ender 3.

Tabla 12. Características y especificaciones técnicas de la impresora 3D Creality Ender 3.

Tecnología	Fabricación con Filamento Fundido (FFF)
Cabezal de impresión	Un extrusor
Volumen de Impresión	220 x 220 x 250mm
Diámetro del filamento	1.75 mm
Resolución de capa	0.1mm – 0.4mm
Precisión	± 0.1mm
Velocidad de impresión	≥ 180 mm/s
Materiales aceptados	PLA, ABS, Wood, PETG
Diámetro de boquilla	0.4mm ajustable a 0.2mm, 0.3mm
Temperatura de Extrusor	255 °C
Temperatura de cama	110 °C
Nivelación de cama	Manual
Conectividad	Memoria USD con adaptador SD
Sensor de energía	Si
Sensor de filamento	No
Entrada AC	100-120V/6.8A 200-240V/3.4A 50/60Hz
Salida DC	24V 1270W
Softwares compatibles	Slic3r / Cura / Software libre
Sistemas Operativos	Windows, Mac, Linux
Tipo de archivos	STL, OBJ, AMF

Fuente: («Creality Ender 3», s. f.)

4. DISEÑO DE COMPONENTES DEL EQUIPO DE ELECTROHILADO

4.1 Diseño de elementos mecánicos del colector

El colector seleccionado es diseñado de forma cilíndrica ya que con esta forma geométrica y a las diversas velocidades de rotación que puede tener este elemento durante su funcionamiento, permite recolectar y disponer de nano, microfibras y a su vez la formación membranas en formas más alineadas, mejorando también las propiedades morfológicas, físicas y mecánicas de estas estructuras electrohiladas. La superficie del colector va a tener un recubrimiento de aleación de aluminio obtenido del reciclaje de latas de cerveza, por lo que este material tiene excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas. Caracterizándose por su alta resistencia al óxido y a la corrosión, además tiene muy buena conductividad eléctrica facilitando el flujo de corriente durante todo el proceso de electrohilado al estar cerrado el circuito. En la parte interior del colector estará fabricado en impresión 3D con filamento de material base PETG por sus excelentes propiedades físicas y mecánicas.

Por las ventajas que tiene el diseño de este tipo de colector, se establece la velocidad de rotación como la variable independiente más importante a tener en cuenta para el correcto funcionamiento. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por (Gómez-Tejedor et al., 2011) concluye que durante el proceso de electrohilado se obtuvieron diversas muestras de nano y microfibras a diferentes velocidades de rotación del colector cilíndrico (1200, 2500 y 3800 rpm) observando cambios en las características mecánicas de las fibras a medida que se aumentaba la velocidad y se alienaban las fibras.(Gómez-Tejedor et al., 2011)

Por las razones ya mencionadas se tomará como referencia una velocidad máxima de rotación de 5000rpm ya que es la velocidad que dispone el motor eléctrico reciclado de 12V corriente continua. Para tener una distancia adecuada del colector con respecto al motor se dispondrá de un tren de transmisión que permita transmitir la velocidad de giro del motor al colector. Y ya que uno de los objetivos de este mecanismo es obtener diversos rangos de velocidad de giro del colector, se conectará un módulo PWM variador de velocidad motores DC 6V~28V (3A) (*Ferretrónica - Suministro de Componentes Electrónicos*, s. f.) que permite controlar la intensidad de corriente a un circuito (*Potenciómetro*, s. f.) y por ende la velocidad del motor por medio de un potenciómetro y por la técnica de modulación de pulso (PWM) sin tener pérdidas de torque del motor.

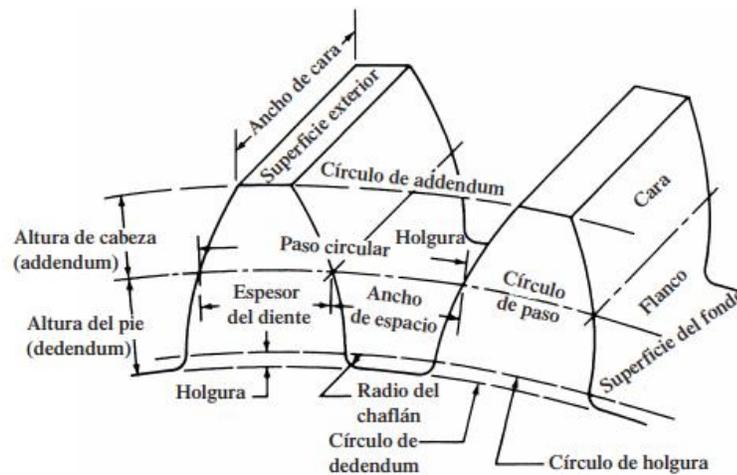
Para transmitir el movimiento y giro de rotación del motor al colector se usarán engranajes helicoidales que permiten transmitir con precisión y confiabilidad la velocidad de giro. Por lo que es necesario diseñar estos elementos describiendo la geometría y calcular las dimensiones de las propiedades principales que los componen, además de calcular las fuerzas que ejerce un engranaje helicoidal sobre su engranaje acoplado, calcular el esfuerzo debido a la flexión y diseñar engranajes desde el punto de vista de la durabilidad de la superficie. (Mott, 2006a) Continuando con los elementos de diseño del mecanismo se diseñarán cuñas, acoplamientos, diseño de ejes y selección de cojinetes.

4.1.1 Análisis cinemático de engranajes del tren de transmisión del colector

Para establecer el análisis en el movimiento de los engranajes se deberá conocer algunas definiciones y propiedades de los engranajes.

La transmisión de movimiento en engranajes sucede cuando dos de estos elementos se engranan, el engranaje menor se llama piñón y al mayor se llama engranaje, por lo que se deben describir las propiedades de los dientes individuales que se podrán observar en la figura 17 donde se indicarán los símbolos de las diversas propiedades.

Figura 17. Características de los dientes de engranajes rectos



Fuente: (Mott, 2006a)

Se estudiarán algunos conceptos de las propiedades de los engranajes para poder tener un diseño cinemático adecuado para el funcionamiento del tren de engranajes.

- **Paso de engranajes rectos:** La distancia entre dientes adyacentes y el tamaño de los dientes se controla mediante el paso de los dientes. (Mott, 2006a) Entre los tipos más usados están paso diametral y modulo métrico.
 - **Círculo de paso (p):** es la distancia de un punto del diente de un engrane en el círculo de paso al punto correspondiente del siguiente diente, medida a lo largo del círculo de paso. (Mott, 2006a)

$$p = \frac{\pi}{P_d} \quad \text{Ec. 1 (Mott, 2006a)}$$

- **Paso diametral P_d** : es igual al número de dientes por pulgada de diámetro de paso.(Mott, 2006a)

$$P_d = \frac{N_G}{D_G} = \frac{N_p}{D_p} \quad \text{Ec. 2 (Mott, 2006a)}$$

Donde N_G es el número de dientes del engranaje y N_p el número de dientes del piñón. (Mott, 2006a)

- **Modulo métrico**: es el paso de los engranajes del sistema métrico se define como el diámetro de paso del engranaje en (mm) entre el número de dientes.(Mott, 2006a)

$$m = \frac{D_G}{N_G} = \frac{D_p}{N_p} \quad \text{Ec. 3 (Mott, 2006a)}$$

Al relacionar el modulo con el paso diametral se define de la siguiente manera.

$$m = \frac{1}{P_d} = \frac{25,4}{P_d} \quad \text{Ec. 4 (Mott, 2006a)}$$

- **Diámetro de paso**: durante el transcurso de engranado hay dos círculos uno para cada engranaje los cuales permanecen tangentes uno con respecto al otro. Por lo que el diámetro de paso es el diámetro del círculo de paso. Se usara D_p como el diámetro de paso del piñón y D_G como el diámetro de paso del engranaje.(Mott, 2006a)

$$D = \frac{N}{P_d} \quad \text{Ec. 5 (Mott, 2006a)}$$

$$D = N * m \quad \text{Ec. 6 (Mott, 2006a)}$$

- **Propiedades del diente de engrane recto.**

- **Adendum** o altura de la cabeza (**a**): es la trayectoria radial desde el círculo de paso hasta la superficie externa de un diente.(Mott, 2006a)
- **Dedendum**, o altura del pie (**b**): es la trayectoria radial desde círculo de paso hasta la base del espacio del diente.(Mott, 2006a)
- **Holgura (c)**: La trayectoria radial desde el exterior del diente hasta la base del hueco entre dientes del engrane opuesto, cuando el diente es completamente engranado.(Mott, 2006a)

$$c = b - a \quad \text{Ec. 7 (Mott, 2006a)}$$

Tabla 13. fórmulas para características de dientes de engranes para un ángulo de presión de 20°

Propiedad	Símbolo	Paso grueso ($P_d < 20$)	Paso fino ($P_d \geq 20$)	Sistema de módulo métrico
Adendum	a	$\frac{1}{P_d}$	$\frac{1}{P_d}$	1m
Dedendum	b	$\frac{1,25}{P_d}$	$\frac{1,2}{P_d} + 0,002$	1.25m
Holgura	c	$\frac{0,25}{P_d}$	$\frac{0,2}{P_d} + 0,002$	0,25m

Fuente: (Mott, 2006a)

- **Diámetro exterior (D_o)**: El diámetro del círculo que encierra el exterior de los dientes del engrane.(Mott et al., 2006)

$$D_o = D + 2a \quad \text{Ec. 8}$$

- **Diámetro de raíz (D_r)**: es el diámetro del círculo que contiene el fondo del espacio de diente. (Mott et al., 2006)

$$D_r = D - 2b \quad \text{Ec. 9}$$

- **Altura total (h_t)**: es la profundidad total del diente.(Mott et al., 2006)

$$h_f = a + b \quad \text{Ec. 10}$$

- **Profundidad de trabajo (h_k):** Es la distancia radial que un diente de engrane se introduce en el espacio entre dientes del engrane correspondiente.(Mott et al., 2006)

$$h_t = 2a \quad Ec. 11$$

- **Espesor del diente (t):** Es la longitud del arco, medida en el círculo de paso, de un lado de un diente al otro lado.(Mott et al., 2006)

$$t = \frac{\pi}{2P_d} \quad Ec. 12$$

- **Ancho de la cara (F):** Es el ancho del diente, medido en dirección paralela al eje del diente.(Mott et al., 2006)

- **Distancia entre centros (C):** es la distancia del centro del piñón al centro del engranaje.(Mott et al., 2006)

$$C = \frac{D_G}{2} + \frac{D_p}{2} \quad Ec. 13$$

- **Angulo de presión (ϕ):** es el que forma la tangente a los círculos de paso y la línea trazada normal (perpendicular) a la superficie del diente del engrane.(Mott et al., 2006)

- **Relación de contacto (m_f):** este término se usa para indicar el número promedio de dientes en contacto durante la transmisión de potencia. Una relación mínima recomendada es de 1.2.(Mott et al., 2006)

$$m_f = \frac{\sqrt{R_{oP}^2 - R_{bP}^2} + \sqrt{R_{oG}^2 - R_{bG}^2} - C \sin \phi}{p \cos \phi} \quad Ec. 14$$

Donde,

ϕ = Angulo de presión

R_{oP} = Radio exterior del piñón = $D_{oP}/2$

R_{bP} = Radio del círculo base para el piñón = $D_{bP}/2$

R_{oG} = Radio exterior del engrane mayor = $D_{oG}/2$

R_{bG} = Radio del círculo base para el engranaje mayor = $D_{bG}/2$

C = Distancia entre centros

p = Paso circular

- **Interferencia entre dientes de engranes rectos**

No se deben tolerar interferencias entre la punta del diente del piñón y el chaflán o raíz de los dientes del engrane mayor (Mott et al., 2006) porque los dientes no van a engranar. Por lo cual se establece en la tabla el número de dientes para cerciorar que no haya interferencia.

Tabla 14. Numero de dientes para asegurar que no haya interferencia

Piñón engranado con una cremallera, profundidad total		Piñón 20°, profundidad total, engranado con un engrane	
Forma del diente	# mínimo de dientes	# dientes del piñón	# dientes máximo del engrane
Envolvente 14,5°	32	17	1309
Envolvente 20°	18	16	101
Envolvente 25°	12	15	45
		14	26
		13	16

Fuente: (Mott, 2006a)

- **Relación de velocidades y trenes de engranes**

- **Relación de velocidades (VR):** se define como la relación de la velocidad angular del engrane de entrada a la del engrane de salida para un solo par de engranajes. (Mott et al., 2006) la velocidad lineal (v_t) de paso de un punto en cualquiera de los círculos de paso es la misma. (Mott et al., 2006)

$$v_t = R\omega \quad \text{Ec. 15}$$

La relación de velocidad se puede definir en cualquiera de las siguientes formas:

$$VR = \frac{\omega_p}{\omega_G} = \frac{n_p}{n_G} = \frac{R_G}{R_p} = \frac{D_G}{D_p} = \frac{N_G}{N_p} = \frac{\text{velocidad}_p}{\text{velocidad}_G} = \frac{\text{tamaño}_G}{\text{tamaño}_p} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde,

n_p = Velocidad angular del piñón en rpm

n_G = Velocidad angular del engrane en rpm

Si la relación de velocidad es mayor de 1 son reductores de velocidad, pero si la relación de velocidad es inferior a 1 es incrementador de velocidad.

- **Tren de engranajes (TV):** Un tren de engranajes es uno o más pares de engranajes que trabajan en conjunto para transmitir potencia, (Mott et al., 2006) existe un cambio de velocidad de un engranaje al otro por los distintos tamaños de ellos. El valor del tren de engranajes es el producto de los valores de VR para cada par de engranajes del tren. (Mott et al., 2006)

$$TV = (VR_1)(VR_2)(VR_3)(VR_4) \dots (VR_n) \quad \text{Ec. 17}$$

- **Geometría de engranajes helicoidales:** en los engranajes helicoidales los dientes están inclinados formando un ángulo con respecto al eje de engrane a este ángulo se denomina ángulo de hélice (ψ). (Mott, 2006a) La forma de los dientes helicoidales se parece mucho a los engranajes rectos solo se debe tener en cuenta el ángulo de hélice. (Mott, 2006a)

- **Pasos para engranes helicoidales**

Paso circular normal (p_n): El paso circular normal es la distancia entre puntos correspondientes sobre dientes adyacentes, medida en la superficie de paso y en la dirección normal. (Mott, 2006a)

$$p_n = p \cos \psi \quad \text{Ec. 18}$$

Paso diametral normal (P_{nd}): es el paso diametral equivalente en el plano normal de los dientes. (Mott, 2006a)

$$P_{nd} = \frac{P_d}{\cos \psi} \quad \text{Ec. 19}$$

Paso axial (P_x): es la distancia entre los puntos correspondientes en dientes adyacentes, medida en la superficie de paso y en dirección axial. (Mott, 2006a)

$$P_x = \frac{p}{\tan \psi} \quad \text{Ec. 20}$$

Luego de conocer estas definiciones y propiedades se procede a realizar el análisis cinemático de los engranajes del tren de transmisión del colector realizando los siguientes pasos:

Primero: Se definirá la relación de transmisión donde la velocidad de entrada será la velocidad máxima del motor (5200 rpm) y la velocidad de salida será la velocidad final máxima (5200 rpm) obteniendo a través de Ec. 2 el siguiente resultado.

$$TV = \frac{\omega_{ent}}{\omega_{sal}} = \frac{5200rpm}{5200rpm} = 1$$

Se define así una relación de velocidad del tren de engranajes de 1.

Segundo: Debido a que el motor debe estar ubicado a una distancia adecuada con respecto al cilindro para que el campo eléctrico generado durante el proceso de electrohilado no afecte el buen funcionamiento del motor se establece una distancia de 135 mm. Por esta razón se definirán las razones de velocidad de cada una de las parejas de engranajes individuales que permiten alcanzar la relación de velocidad del tren de transmisión (1) definido en el primer paso. Este cálculo se realizará sustituyendo la Ec. 16 en la Ec. 17 usando los valores de número de dientes del piñón (13 dientes) y del engrane (22 dientes).

$$VR = \frac{N_G}{N_p}$$

$$TV = (VR_1)(VR_2)(VR_3)(VR_4) \dots (VR_n)$$

$$TV = \frac{22\text{dientes}}{13\text{dientes}} * \frac{13\text{dientes}}{22\text{dientes}} * \frac{22\text{dientes}}{13\text{dientes}} * \frac{13\text{dientes}}{22\text{dientes}} = 1$$

Tercero: se calcularán las demás propiedades de los dientes de los engranajes aplicando las ecuaciones ya mencionadas en este capítulo. Usando los siguientes datos: ángulo de presión de 20°, ángulo hélice 5° y paso diametral de 16, número de dientes del piñón $N_p = 13$ y número de dientes del engranaje $N_G = 22$ obteniendo los resultados en la tabla 15:

Tabla 15. Resultados propiedades de dientes de engranajes helicoidales

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,812 in	1,375 in	0,196 in	0,196 in	0,062 in	0,078 in	0,015 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)

0,937 in	1,5 in	0,656 in	1,219 in	0,14 in	0,124 in	0,098 in
Distancia entre centros (C)	Diámetro círculo base piñón (D_{bp})	Diámetro círculo base engranaje (D_{bg})	Paso circular normal (p_n):	Paso diametral normal (P_{nd})	Paso axial (P_x)	Ancho de cara (F)
1,094 in	0,763 in	1,292 in	0,195 in	16,061 in	2,257 in	0,275 in
Relación de contacto (m_f)				1,31		

Fuente: Autores

4.1.2 *Calculo de fuerzas y esfuerzos que se ejercen en los engranajes helicoidales*

- *Calculo de las fuerzas que actúan sobre los dientes de engranajes helicoidales*

Fuerza tangencial (W_t): es la fuerza que actúa en el plano transversal y produce el par torsional que se transmitirá del engrane motriz al engrane conducido se le llama con frecuencia fuerza transmitida. (Mott et al., 2006)

Si se conoce el par torsional (T) y el diámetro del engrane (D)

$$W_t = \frac{T}{\frac{D}{2}} \quad \text{Ec. 21}$$

También se puede expresar con unidades de potencia si la potencia esta en caballos de fuerza y la velocidad de giro en rpm.

$$W_t = \frac{126000P}{nD} \quad \text{Ec. 22}$$

Fuerza radial (W_r): es la fuerza que actúa hacia el centro del engrane perpendicular al círculo de paso y a la fuerza tangencial, tiende a separar a los dos engranes. (Mott et al., 2006)

$$W_r = W_t \tan \phi_t \quad \text{Ec. 23}$$

Fuerza axial (W_x): es la fuerza que actúa paralela al eje del engrane y causa una carga de empuje que deben resistir los cojinetes que soportan el eje. (Mott, 2006a)

$$W_x = W_t \tan \psi \quad \text{Ec. 24}$$

- **Procedimiento para realizar el análisis de fuerzas y esfuerzos de los engranajes del colector**

Debido a que el colector no está transmitiendo par torsional a ningún otro elemento y la fuerza de fricción a la que podría estar expuesta se despreciaría, por el uso de rodamientos, debido a que estos elementos reducen la fricción entre las piezas que se hallan en contacto, por lo que también se despreciaría esta fuerza. Por lo anteriormente mencionado se usará la masa de los componentes del colector para determinar la fuerza que soporta el tren de transmisión al girar el colector.

El colector tiene una masa de $m = 0,3kg$,

$$F = m * a = m * g$$

$$F = 0,3kg * 9,81 \frac{m}{seg^2} = 2,943N = 0,6616lbf$$

El par torsional para poder girar el colector se expresa de la siguiente forma

$$T = F * \left(\frac{D_p}{2} \right) \quad \text{Ec. 25}$$

El diámetro de paso que gira el colector es $D_p = 0,812in$ entonces el par torsional es

$$T = 268,61 * 10^{-3}lbf * in$$

Con el valor de la fuerza tangencial se procede a determinar el torque, fuerza tangencial, fuerza axial y fuerza radial de cada uno de los demás engranajes se obtendrán los resultados descritos en la *tabla 16*.

Tabla 16. Fuerza en los dientes de engranajes del colector

	Par torsional (<i>lbf * in</i>)	Fuerza tangencial (<i>lbf</i>)	Fuerza radial (<i>lbf</i>)	Fuerza axial (<i>lbf</i>)
Engranaje colector	$268,62 * 10^{-3}$	0,662	0,241	0,058
4to engranaje	$454,85 * 10^{-3}$	0,662	0,241	0,058
3er engranaje	$268,62 * 10^{-3}$	0,662	0,241	0,058
2do engranaje	$454,85 * 10^{-3}$	0,662	0,241	0,058
Piñón motor	$268,62 * 10^{-3}$	0,662	0,241	0,058

Fuente: Autores

- ***Calculo de los esfuerzos en los dientes de engranajes helicoidales***

Se calculará el número de esfuerzo flexionante para los dientes de engranajes helicoidales con la siguiente expresión, (Mott, 2006a)

$$s_t = \frac{W_t P_d}{FJ} K_0 K_s K_m K_B K_v \quad \text{Ec. 26}$$

Donde,

J = factor de geometría (figura 10-6 de (Mott, 2006a))

K_0 = factor de sobrecarga (tabla 9-5 de (Mott, 2006a))

K_s = factor por tamaño (tabla 9-6 de (Mott, 2006a))

K_m = factor de distribución de cargas (figura 9-18, 9-19 y ecuación (9-16) de (Mott, 2006a))

K_B = factor de espesor de borde (figura 9-20 de (Mott, 2006a))

K_v = factor dinámico (figura 9-21 de (Mott, 2006a))

Se definirán los valores para los diversos factores obteniendo los siguientes resultados

- Factor de sobrecarga K_0 : se utiliza un motor electrico y será utilizado para el trasporte de una carga uniforme el $K_0 = 1,25$.
- Factor de tamaño K_s : el paso diametral de los engranajes son ≥ 5 entonces $K_s = 1,00$.
- Factor de distribución de carga K_m : se usara la siguiente expresión para determinar el factor de distribución de carga

$$K_m = 1,0 + C_{pf} + C_{ma} \quad Ec. 27$$

Donde,

C_{pf} =factor de proporción de piñón (figura 9-18 de (Mott, 2006a))

C_{ma} =factor por alineamiento de engranado (figura 9-19 de (Mott, 2006a)) al ser engranajes abiertos $C_{ma} = 0,251$.

Se calcula el factor de proporción del piñón con la siguiente expresión,

$$C_{pf} = \frac{F}{10D_p} - 0,025 \quad Ec. 28$$

$$C_{pf} = 0,035$$

Aplicando la Ec. 42 se obtiene el valor del factor de distribución

$$K_m = 1,0 + 0,251 + 0,035 = 1,286$$

- Factor espesor de orilla K_B : la orilla es suficientemente fuerte para soportar el diente entonces $K_B = 1,00$.

- Factor dinámico K_v : debido a que la velocidad de línea de paso es demasiado baja entonces el $K_v = 1,00$.
- Factor de geometría J : (figura 10-6 de (Mott, 2006a)) se obtienen los valores descritos en la tabla 17

Tabla 17. Factores de geometría engranajes colector

	Factor geometría
Engranaje colector	0,42
4to engranaje	0,44
3er engranaje	0,42
2do engranaje	0,44
Piñón motor	0,42

Tabla 18. Numero de esfuerzos flexionante en los dientes de cada engranaje del tren de transmisión colector

	Numero esfuerzo flexionante (psi)
Engranaje colector	7,67
4to engranaje	7,322
3er engranaje	7,67
2do engranaje	7,322
Piñón motor	7,67

Fuente: Autores

- ***Cálculos a la resistencia a la picadura de los dientes de los engranajes helicoidales***

La resistencia a la picadura de los dientes de los engranajes helicoidales se calcula mediante la siguiente expresión. (Mott, 2006a)

$$s_c = C_p \sqrt{\frac{W_t K_o K_s K_m K_v}{F D_p I}} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde,

I = factor de geometría (tabla 10-1 de (Mott, 2006a))

C_p = coeficiente elástico (tabla 9-9 de (Mott, 2006a))

La resistencia a la picadura de los dientes de engranajes del sistema de dosificación se calcula con la Ec. 29 por lo que es necesario determinar primeramente el coeficiente elástico C_p y el factor de geometría I los demás valores de factores serán los mismos de los que se determinaron para el numero de esfuerzos flexionantes.

Para determinar el valor del coeficiente elástico se usará la siguiente expresión,

$$C_p = \sqrt{\frac{1}{\pi \left\{ \left[\frac{(1 - \nu_p^2)}{E_p} \right] + \left[\frac{(1 - \nu_G^2)}{E_G} \right] \right\}}} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde,

ν = relación de Poisson

E = módulo de elasticidad

Al realizar la sustitución de valores definidos para el material PETG la relación de Poisson $\nu = 0,37$ (Rodríguez Villacampa et al., 2021) y el módulo de elasticidad $E = 2050MPa = 297327,39psi$ («3D Printing Materials of the Highest Quality - Filaments», s. f.)

$$C_p = 234,15$$

Adicional se determina el valor de factor de geometría I para determinar el valor de esfuerzos de contacto de los dientes

Tabla 19. Numero de esfuerzos de contacto en los dientes de los engranajes

	Numero esfuerzo a contacto (<i>psi</i>)
Engranaje colector	3278

4to engranaje	2352
3er engranaje	3278
2do engranaje	2352
Piñón motor	3278

Fuente: Autores

A continuación se determina si el material seleccionado filamento PETG en el que se fabricaran los piñones y engranajes es el adecuado para soportar los esfuerzos flexionantes y resistencia de picado para esto se seleccionara el piñón con el numero flexionante más alto ya que este elemento tiene que soportar el mayor esfuerzo que es el esfuerzo de contacto $s_c = 3278psi$ en los dientes con un factor de confiabilidad $K_R = 1,5$, que tenga una vida útil $L = 10000horas$, el piñón gira a una velocidad de rotación de $n = 5200rpm$ y un ciclo de carga por revolución $q = 1$. Se usa la siguiente expresión para determinar el número de ciclos por carga.

$$N_c = 60 * L * n * q \quad Ec. 31$$

Obteniendo el siguiente resultado,

$$N_c = 3,12 * 10^9 \text{ ciclos}$$

Con este valor se determina el factor de ciclo por esfuerzos $Z_N = 0,8$, además se considera un factor de seguridad de $SF = 1,5$ y una relación de dureza $C_H = 1$. Con la siguiente expresión se determina el esfuerzo de diseño flexionante.

$$s_{ac} = \frac{K_R * SF}{Z_N * C_H} * s_c \quad Ec. 32$$

Obteniendo el siguiente resultado $s_{ac} = 9219psi$

Se concluye que el filamento de PETG es adecuado para soportar el esfuerzo de flexión y resistencia a picadura que actúan sobre los dientes de los engranajes debido a que tienen una resistencia a flexión de 9956,34 *psi*.

4.1.3 *Diseño de fijación de elementos en los ejes*

Se implementará el método de fijación de elementos en los ejes denominado fijación que consiste en perforar a través del cubo y el eje; y se inserta en el orificio un perno. El perno se somete a esfuerzo cortante en dos secciones transversales. (Mott, 2006a)

Si el esfuerzo cortante es igual al esfuerzo cortante del diseño por cortante se calcula el diámetro del perno requerido con la siguiente expresión. (Mott, 2006a)

$$d = \sqrt{\frac{4T}{D(\pi)(\tau_d)}} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde,

τ_d = esfuerzo cortante 3625,94 *psi*

T = par torsional 268,62 * 10⁻³ *lbf * in*

$$d = 0,0173 \text{ in}$$

4.1.4 *Diseño de ejes del tren de transmisión del colector*

Los engranajes sostenidos usualmente por los ejes ejercen fuerzas sobre el eje y causan momentos flexionantes (Mott et al., 2006) por lo que es necesario calcular las fuerzas que se aplican sobre este determinado elemento y determinar las características geométricas que cumplan con los requerimientos necesarios de funcionamiento. (Mott, 2006a)

- **Fuerzas que ejercen los engranajes helicoidales sobre los ejes**

Se calcula la fuerza tangencial que transmite el engranaje

$$W_t = \frac{T}{\frac{d}{2}} \quad \text{Ec. 34}$$

Debido a que los engranajes helicoidales producen una fuerza axial se debe calcular la carga radial con la expresión

$$W_r = \frac{W_t \tan \phi}{\cos \psi} \quad \text{Ec. 35}$$

Luego se calcula la carga axial definida en la Ec. 25 de este libro

$$W_x = W_t \tan \psi \quad \text{Ec. 36}$$

- **Esfuerzo cortante de diseño-esfuerzo cortante vertical invertido**

Debido a que no se aplica par torsional sobre los puntos de un eje y donde los momentos flexionantes son igual a cero o muy bajos, (Mott et al., 2006) frecuentemente están sujetos a fuerzas cortantes verticales significativas que serían en este caso las que rigen el análisis de diseño esto sucede cuando un cojinete lleva un extremo del eje y en esa parte del eje no transmite par torsional alguno. (Mott, 2006a)

Por lo que la expresión requerida para determinar el diámetro mínimo de un eje cilíndrico que será usado para sostener los engranajes del tren de transmisión del colector se expresa de la siguiente forma.

$$D = \sqrt{\frac{2,94 K_t (V) N}{s_n'}} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde,

K_t = concentración de esfuerzos

V = fuerza cortante vertical

N = factor de diseño

s_n' = resistencia a la fatiga

K_t = concentración de esfuerzos, es igual a 1 ya que los ejes no poseen discontinuidades geométricas que produzcan concentración de esfuerzos.

V = fuerza cortante vertical es el valor de la fuerza radial que opera sobre los dientes de los engranajes en este caso se escoge el valor de referencia la fuerza radial más alto de todos los engranajes. $V = 0,241lbf$

N = factor de diseño tendrá un valor de 2 que es el valor de factor de diseño para elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con una seguridad promedio en todos los datos de diseño.(Mott et al., 2006)

s_n' = resistencia a la fatiga es la resistencia que tiene el material en el que se van a fabricar los ejes. Debido a que no se conoce la resistencia a la fatiga del filamento PETG se realizara un estimado multiplicando el valor de resistencia a la tracción por 0,4 dando el siguiente resultado,

$$s_n' = 7251,88psi * 0,4 = 2900psi$$

Con todos estos valores se obtiene el valor del diámetro mínimo del eje.

$$D = 22,1 *^{-3} in$$

Se concluye que el eje seleccionado $D = 0,315in$ es el adecuado para ser montado en los rodamientos F688ZZ además de soportar las cargas que actúan sobre el eje.

4.1.5 Selección de rodamientos cargas radiales y de empuje combinadas

Si se ejercen al mismo tiempo cargas radiales y de empuje la carga equivalente es la carga radial constante que producirá la misma duración nominal del rodamiento que la carga combinada. (Mott et al., 2006) (Mott et al., 2006) La expresión para el cálculo de la carga equivalente (P) tiene la siguiente forma:

$$P = VXR + YT \quad Ec. 38$$

Donde,

P = carga equivalente

V = factor por rotación (Mott et al., 2006) $V = 1$

R = carga radial aplicada (Mott et al., 2006) $W_r = 0,241lbf$

T =carga de empuje aplicada (Mott et al., 2006) $W_x = 0,058lbf$

X = factor radial (Mott et al., 2006) $X = 0,56$

Y = factor de empuje (Mott et al., 2006) (tabla 14,5) $Y = 1,5$

$$P = 0,222lbf$$

Luego de calcular la capacidad de carga dinámica C utilizando el factor de velocidad $f_N = 0,17$ y el factor por duración $f_l = 2,7$ obtenidos de la figura 14-12 de (Mott, 2006a). la capacidad de carga dinámica se calcula mediante la siguiente expresión,

$$C = P * \frac{f_l}{f_N} \quad Ec. 39$$

$$C = 3,525 lbf$$

Se concluye que el rodamiento seleccionado Rodamiento F688ZZ es satisfactorio para soportar las cargas aplicadas al tener una capacidad de carga dinámica $C = 281,6 lbf$.

4.2 Diseño de los elementos mecánicos del sistema de dosificación de la solución polimérica

Debido a que el flujo de salida de la disolución polimérica es un parámetro muy significativo para la obtención y caracterización de las membranas electrohiladas, es necesario definir un sistema de dosificación adecuado, que cumpla con los requerimientos necesarios. Para el correcto funcionamiento de este sistema se tiene en cuenta el flujo volumétrico de dosificación que es el volumen de la solución polimérica que se mueve en una sección por unidad de tiempo. (Mott, 2006b) Según los estudios realizados por (Sierra Cárdenas, 2018) define que el flujo adecuado de dosificación de solución polimérica con 16% de concentración para la obtención de membranas a base de PLA es de 0,6 ml/h.

Para poder controlar esta variable es necesario definir que la cantidad de fluido que circula a través de cualquier sección en cierta cantidad de tiempo es constante. (Mott et al., 2006) El flujo volumétrico se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = Av \quad Ec. 40$$

Donde Q es el flujo volumétrico, A es el área de la sección y v velocidad promedio de flujo. (Mott, 2006a)

Como el flujo volumétrico y el área de sección de la jeringa son constantes se calcula la velocidad promedio de flujo despejando la velocidad (v) de la Ec. 32, del flujo volumétrico quedando de la siguiente forma:

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 41}$$

Para el sistema de dosificación se usará una jeringa desechable de 10ml de capacidad y una aguja de 0,8mm de diámetro.

4.2.1 Análisis cinemático de tren de transmisión del sistema de dosificación

- 1) Para determinar el valor de la velocidad promedio que requiere el sistema de dosificación es necesario calcular el área trasversal de la jeringa. Teniendo que el diámetro necesario para el cálculo es el diámetro interno del cuerpo de la jeringa ya que es la zona en la que se encuentra contenida la solución polimérica durante el proceso de electrohilado. El valor del diámetro interno de las jeringas que se van a usar es de 15 mm, para determinar el valor del área transversal se usa la Ec..

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = 176,7mm^2$$

- 2) Teniendo el valor del área transversal de la jeringa se realiza el cálculo de la velocidad promedio en la que se desplaza el fluido por la jeringa, para el cálculo es necesario establecer un valor de flujo volumétrico de referencia eligiendo $Q =$

1ml/h siendo este el valor máximo de flujo volumétrico que puede dosificar el sistema de inyección. Al realizar conversión de unidades se obtiene un valor equivalente a $0,278mm^3/seg$. Teniendo los valores ya mencionados se calcula la velocidad lineal promedio por medio de la ecuación 41.

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = 1,57 * 10^{-3} \frac{mm}{seg}$$

- 3) Debido a que la fuente del movimiento es un motor que entrega velocidad de giro, es necesario determinar el valor de la velocidad de rotación que requiere el tren de transmisión para lograr obtener un valor de velocidad constante promedio de $1,57 * 10^{-3}mm/seg$. Para calcular la velocidad de rotación es necesario tener el valor del radio base del engranaje que es de 12 mm y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{v}{r}$$

$$\omega = 0,131 * 10^{-3} \frac{rad}{seg} = 0,00125 rpm$$

- 4) Para realizar el análisis cinemático de los engranajes se usan las ecuaciones mencionadas en el capítulo 4.1.1 1 análisis cinemático de engranajes, se definirá la relación de transmisión donde la velocidad de entrada será la velocidad máxima del motor (100 rpm) y la velocidad de salida será la velocidad final máxima (0,00125 rpm) obteniendo a través de la ecuación número 2 el siguiente resultado.

$$TV = \frac{\omega_{ent}}{\omega_{sal}} = \frac{100rpm}{0,00125rpm} = 80000$$

Se define así una relación de velocidad del tren de engranajes de 80000:1 por lo que el valor de la relación de velocidad es mayor a 1 es un tren de transmisión reductor.

- 5) Se definirán las razones de velocidad de cada una de las parejas de engranajes individuales para alcanzar relación de velocidad del tren de transmisión (80000) definido en el primer paso. Este cálculo se realizará sustituyendo la Ec. 16 en la Ec. 17 usando los valores de numero de dientes de las parejas de engranes (piñón-engrane).

$$VR = \frac{N_G}{N_p}$$

$$TV = (VR_1)(VR_2)(VR_3)(VR_4) \dots (VR_n)$$

$$TV = \frac{32dientes}{13dientes} * \frac{40dientes}{13dientes} * \frac{56dientes}{13dientes} * \frac{72dientes}{13dientes} * \frac{88dientes}{13dientes} * \frac{103dientes}{13dientes} * \frac{108dientes}{13dientes} = 80513$$

- 6) Se calculan las demás propiedades de los dientes para cada pareja de engranes utilizando las ecuaciones descritas en capítulo 4.1.1 Análisis cinemático de engranajes con algunos datos descritos para cada conjunto de engranajes.

- Primera pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 32, ángulo de presión de 20°, ángulo hélice 0° y un paso diametral de 48 obteniendo los resultados en la tabla 20:

Tabla 20. propiedades de dientes primera pareja de engranajes

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,271 in	0,667 in	0,065 in	0,065 in	0,021 in	0,026 in	0,005 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,313 in	0,708 in	0,219 in	0,625 in	0,047 in	0,042 in	0,033 in
Distancia entre centros (C)		Diámetro círculo base piñón (D_{bP})		Diámetro círculo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)	
0,469 in		0,254 in		0,626 in	1,356	

Fuente: Autores

- Segunda pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 40, ángulo de presión de 20° , ángulo hélice 0° y un paso diametral de 40 obteniendo los resultados en la tabla 21:

Tabla 21. Propiedades dientes segunda pareja de engranajes

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,325 in	1 in	0,079 in	0,079 in	0,025 in	0,031 in	0,006 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,375 in	1,05 in	0,263 in	0,938 in	0,056 in	0,05 in	0,039 in
Distancia entre centros (C)		Diámetro círculo base piñón (D_{bP})		Diámetro círculo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)	
0,663 in		0,305 in		0,939 in	1,382	

Fuente: Autores

- Tercera pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 56, ángulo de presión de 20°, ángulo hélice 0° y un paso diametral de 40 obteniendo los resultados en la tabla 22:

Tabla 22. Propiedades de diente tercera pareja de engranajes

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,325 in	1,4 in	0,079 in	0,079 in	0,025 in	0,031 in	0,006 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,375 in	1,45 in	0,263 in	1,338 in	0,056 in	0,05 in	0,039 in
Distancia entre centros (C)		Diámetro circulo base piñón (D_{bP})		Diámetro circulo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)	
0,863 in		0,305 in		1,315 in	1,417	

Fuente: Autores

- Cuarta pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 72, ángulo de presión de 20°, ángulo hélice 0° y un paso diametral de 40 obteniendo los resultados en la tabla 23:

Tabla 23. Propiedades de diente cuarta pareja de engranajes

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,325 in	1,8 in	0,079 in	0,079 in	0,025 in	0,031 in	0,006 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,375 in	1,85 in	0,263 in	1,738 in	0,056 in	0,05 in	0,039 in

Distancia entre centros (C)	Diámetro círculo base piñón (D_{bP})	Diámetro círculo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)
1,063 in	0,305 in	1,69 in	1,441

Fuente: Autores

- Quinta pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 88, ángulo de presión de 20° , ángulo hélice 0° y un paso diametral de 40, obteniendo los resultados en la tabla 24:

Tabla 24. Propiedades de dientes quinta pareja de engranajes

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,325 in	2,2 in	0,079 in	0,079 in	0,025 in	0,031 in	0,006 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,375 in	2,25 in	0,263 in	2,138 in	0,056 in	0,05 in	0,039 in
Distancia entre centros (C)	Diámetro círculo base piñón (D_{bP})	Diámetro círculo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)			
1,263 in	0,305 in	2,066 in	1,459			

Fuente: Autores

- Sexta pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 103, ángulo de presión de 20° , ángulo hélice 0° y un paso diametral de 40 obteniendo los resultados en la tabla 25:

Tabla 25. Propiedades de dientes sexta pareja de engranajes

Diámetro paso	Diámetro paso	Paso circular piñón	Paso circular engrane	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)

piñón (D_p)	engrane (D_G)	(p)	(p)			
0,325 in	2,575 in	0,079 in	0,079 in	0,025 in	0,031 in	0,006 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,375 in	2,625 in	0,263 in	2,513 in	0,056 in	0,05 in	0,039 in
Distancia entre centros (C)		Diámetro círculo base piñón (D_{bP})		Diámetro círculo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)	
1,45 in		0,305 in		2,418 in	1,472	

Fuente: Autores

- Séptima pareja de engranajes: Numero dientes piñón 13, numero dientes engranaje mayor 108, ángulo de presión de 20°, ángulo hélice 0° y un paso diametral de 40 obteniendo los resultados en la tabla 26:

Tabla 26. Propiedades de dientes séptima pareja de engranajes

Diámetro paso piñón (D_p)	Diámetro paso engrane (D_G)	Paso circular piñón (p)	Paso circular engrane (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)
0,325 in	2,7 in	0,079 in	0,079 in	0,025 in	0,031 in	0,006 in
Diámetro exterior piñón (D_{oP})	Diámetro exterior engrane (D_{oG})	Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Diámetro raíz engranaje (D_{RG})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)
0,375 in	2,75 in	0,263 in	2,638 in	0,056 in	0,05 in	0,039 in
Distancia entre centros (C)		Diámetro círculo base piñón (D_{bP})		Diámetro círculo base engranaje (D_{bG})	Relación de contacto (m_f)	
1,513 in		0,305 in		2,535 in	1,477	

Fuente: Autores

4.2.2 Análisis cinemático de transmisión piñón y cremallera

La finalidad de la transmisión del movimiento para el sistema de inyección es poder obtener una velocidad lineal constante y que a su vez permita accionar el embolo de la jeringa. Por lo que el mecanismo adecuado que puede cumplir con estas funciones es el uso de la configuración básica piñón y cremallera además de que evita el deslizamiento de las piezas móviles. Por lo que es necesario realizar el análisis cinemático que permite establecer el diseño adecuado del piñón y la cremallera. Para esto se usarán los siguientes valores de datos obtenidos en el capítulo 4.2.1 análisis cinemático del tren de transmisión del sistema de dosificación.

$v = 1,57 * 10^{-3} \frac{mm}{seg}$ es la velocidad lineal requerida para obtener un flujo volumétrico de 10ml/h

$\omega = 0,00125 rpm$ es la velocidad de rotación final que entrega el tren de transmisión del sistema de dosificación.

$r = 12mm$ es el radio base calculado que permite obtener el valor de la velocidad lineal requerido por el sistema.

Con los valores ya mencionados se obtiene las siguientes propiedades de los dientes del piñón y cremallera.

Tabla 27. Propiedades de dientes piñón cremallera

Diámetro paso piñón (D_p)	Paso circular piñón (p)	Addendum (a)	Dedendum (b)	Holgura (c)	Diámetro exterior piñón (D_{oP})
24mm	3,77mm	1,2mm	1,5mm	0,3mm	26,4mm

Diámetro raíz piñón (D_{RP})	Altura total (h_t)	Profundidad trabajo (h_k)	Espesor diente (t)	Paso diametral (P_d)	Ancho de cara (F)
21mm	2,7mm	2,4mm	1,885mm	0,833	8mm

Fuente: Autores

4.2.3 *Calculo de fuerzas y esfuerzos que se ejercen en los engranajes del sistema de inyección*

Para determinar si las piezas diseñadas tienen la capacidad de soportar las diversas cargas y esfuerzos a las que pueden estar expuestos, es necesario realizar los cálculos que permitan garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Por lo que es necesario establecer la carga final que va a soportar el mecanismo, que es la fuerza que requiere ejercer el embolo sobre la solución polimérica para obtener el flujo volumétrico de dosificación adecuado. Primero se determina la presión que se aplica a la solución polimérica para que permita alcanzar el flujo volumétrico de dosificación. Para determinar este valor es necesario implementar la siguiente ecuación denominada ecuación de Bernoulli,

$$\frac{P_1}{\rho} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad Ec. 42$$

Donde,

P_1 = presión en la jeringa

ρ =densidad de la solución polimérica

z_1 =altura del fluido en la jeringa

v_1 = velocidad del flujo volumétrico en la jeringa

g =gravedad

P_2 = presión en la sección de la aguja

z_2 = altura del fluido en la sección de la aguja

v_2 = velocidad de flujo en la sección de la aguja

Debido a que la jeringa y la aguja está en posición horizontal no habría diferencia de altura por lo que $z_1 = z_2$, la presión en la sección de la aguja sería igual a cero al estar expuesto a la atmosfera por lo que se cancelaría en la expresión y se determinaría la presión de la sección de la jeringa, quedando la expresión de la siguiente forma

$$P_1 = \rho \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) \quad Ec. 43$$

Para determinar la densidad de la solución polimérica es necesario determinar la concentración porcentual peso/volumen de la solución polimérica usando la siguiente expresión

$$\frac{w}{v} \% = \frac{m_g(PLA)}{v_{ml(solvente)}} * 100\% \quad Ec. 44$$

En el estudio realizado por (Sierra Cárdenas, 2018) se usó una concentración de 16% de solución polimérica de PLA y 2,2,2 Trifluoroetanol en la que se obtuvieron membranas de PLA. Para el funcionamiento del prototipo se establecerá una concentración de solución polimérica experimental del 40% para poder tener un mayor rango de caracterización de membranas de PLA.

Ahora se determina la densidad del compuesto a una concentración del 40% por medio de la siguiente ecuación.

$$\rho_{compuesto} = (\text{fraccionvolumetrica}_{PLA} * \rho_{PLA}) + (\text{fraccionvolumetrica}_{solvente} * \rho_{solvente} \quad \text{Ec. 45}$$

Realizando la sustitución de los valores de densidad de cada uno de las sustancias se obtiene la densidad del compuesto,

$$\rho_{compuesto} = 1351,8kg/m^3$$

Se calcula la velocidad promedio de flujo en el área transversal de la aguja de 0,8mm de diámetro con un flujo volumétrico de $Q = 10ml/h = (2,78mm^3)/seg$

El área trasversal de aguja se calcula utilizando la ecuación 34,

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0,5mm^2$$

Se calcula la velocidad promedio de flujo en el área transversal de la aguja con el uso de la Ec. 33,

$$v = \frac{Q}{A} = 5,56 \frac{mm}{seg} = v_2$$

Con los valores ya mencionados y la velocidad de flujo de la sección de la jeringa se aplica la Ec. 43, para determinar el valor de la presión que se requiere en el embolo de la jeringa,

$$P_1 = 2,13 * 10^{-3} \frac{kg}{m^2} = 0,0209Pa = 3,029 * 10^{-6}psi$$

Ya determinado el valor de presión que ejerce sobre el área transversal de la sección de la jeringa se determina el valor de la fuerza necesaria por medio de la expresión,

$$P = \frac{F}{A}$$

A= área de la sección transversal de la jeringa

Al despejar la fuerza de la ecuación la expresión quedaría de esta forma,

$$F = P * A$$

Al realizar la sustitución de los valores en la Ec. 41 se halla el valor de la fuerza necesaria obteniendo así el siguiente resultado,

$$F = 0,0209Pa * 176,7 * 10^{-6}m^2 = 3,693 * 10^{-6}N = 8,3 * 10^{-7}lbf$$

Esta fuerza es la fuerza tangencial que actúa sobre los dientes del engranaje que acciona el mecanismo de desplazamiento del embolo.

Con el valor de la fuerza tangencial se precede a determinar el torque, fuerza tangencial, fuerza axial y fuerza radial de cada uno de los engranajes que componen el sistema de dosificación de la solución polimérica, con el uso de las Ec. 21, 23 y 24. Los resultados se describirán en la *tabla 28*.

Tabla 28. fuerzas en los dientes de los engranajes del sistema de dosificación

	Par torsional (<i>lbf * in</i>)	Fuerza tangencial (<i>lbf</i>)	Fuerza radial (<i>lbf</i>)
Engranaje accionamiento	391,76 * 10 ⁻⁹	830 * 10 ⁻⁹	780 * 10 ⁻⁹
7mo engrane		290,193 * 10 ⁻⁹	105,630 * 10 ⁻⁹
7mo piñón			

6to engranaje	$47,16 * 10^{-9}$	$36,626 * 10^{-9}$	$13,332 * 10^{-9}$
6to piñón	$59,52 * 10^{-9}$		
5to engranaje		$5,411 * 10^{-9}$	$1,969 * 10^{-9}$
5to piñón	$8,79 * 10^{-9}$		
4to engranaje		$0,977 * 10^{-9}$	$0,356 * 10^{-9}$
4to piñón	$1,59 * 10^{-9}$		
3er engranaje		$0,227 * 10^{-9}$	$0,083 * 10^{-9}$
3er piñón	$0,37 * 10^{-9}$		
2do engranaje		$0,074 * 10^{-9}$	$0,027 * 10^{-9}$
2do piñón	$0,12 * 10^{-9}$		
1er engranaje		$0,036 * 10^{-9}$	$0,013 * 10^{-9}$
Piñón motor	$0,05 * 10^{-9}$		

Fuente: Autores

- *Calculo de esfuerzos en los dientes de los engranajes del sistema de dosificación.*

Se calcularán el número de esfuerzos flexionantes y resistencia a contacto de los dientes de cada uno de los engranajes utilizando las Ec. 26 y 27 de este libro, para implementar estas ecuaciones es necesario determinar los valores de algunos factores que determinan las condiciones que afectan el diseño final.

- Factor de sobrecarga K_0 : se utiliza un motor electrico y será utilizado para el transporte de una carga uniforme el $K_0 = 1,25$.
- Factor de tamaño K_s : el paso diametral de los engranajes son ≥ 5 entonces $K_s = 1,00$.
- Factor de distribución de carga K_m : se usara la siguiente expresión para determinar el factor de distribución de carga

$$K_m = 1,0 + C_{pf} + C_{ma} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde,

C_{pf} =factor de proporción de piñón (figura 9-18 de (Mott, 2006a))

C_{ma} =factor por alineamiento de engranado (figura 9-19 de (Mott, 2006a)) al ser engranajes abiertos $C_{ma} = 0,251$.

Se calcula el factor de proporción del piñón con la siguiente expresión,

$$C_{pf} = \frac{F}{10D_p} - 0,025 \quad \text{Ec. 50}$$

$$C_{pf} = 0,035$$

Aplicando la Ec. 42 se obtiene el valor del factor de distribución

$$K_m = 1,0 + 0,251 + 0,035 = 1,286$$

- Factor espesor de orilla K_B : la orilla es suficientemente fuerte para soportar el diente entonces $K_B = 1,00$.
- Factor dinámico K_v : debido a que la velocidad de línea de paso es demasiado baja entonces el $K_v = 1,00$.
- Factor de geometría J : (figura 10-6 de (Mott, 2006a)) se obtienen los siguientes valores.

Tabla 29. Factores de geometría J de engranajes sistema de dosificación

# piñón	Factor geometría	# engranaje	Factor geometría
motor	0,42	1ro	0,95
2do	0,42	2do	0,95
3ro	0,42	3ro	0,96
4to	0,42	4to	0,97
5to	0,42	5to	0,98
6to	0,42	6to	0,98
7mo	0,42	7mo	0,97
Piñón accionamiento		0,33	

Fuente: Autores

ya determinados los valores de los factores de que determinan las condiciones que afectan el diseño final se aplica la Ec. 26 obteniendo los resultados de los números de esfuerzos flexionantes para cada piñón y engranaje del sistema de dosificación descritos en la *tabla 26*

Tabla 30. Numero de esfuerzos flexionantes del tren de trasmisión del sistema de dosificación

Numero de engranaje	Numero de esfuerzos flexionantes (<i>psi</i>)
piñón motor	$0,06 * 10^{-6}$
1er engranaje	$0,04 * 10^{-6}$
2do piñón	$0,1 * 10^{-6}$
2do engranaje	$0,07 * 10^{-6}$
3er piñón	$0,31 * 10^{-6}$
3er engranaje	$0,21 * 10^{-6}$
4to piñón	$1,33 * 10^{-6}$
4to engranaje	$0,86 * 10^{-6}$
5to piñón	$7,37 * 10^{-6}$
5to engranaje	$4,77 * 10^{-6}$
6to piñón	$49,9 * 10^{-6}$
6to engranaje	$31,46 * 10^{-6}$
7mo piñón	$395,33 * 10^{-6}$
7mo engranaje	$255,99 * 10^{-6}$
Piñón accionamiento	$10,69 * 10^{-6}$

Fuente: Autores

- ***Cálculos a la resistencia a contacto de los dientes de los engranajes helicoidales del sistema de dosificación***

La resistencia a contacto de los dientes de engranajes del sistema de dosificación se calcula con la Ec. 27

El coeficiente elástico es,

$$C_p = 234,15$$

Adicional se determina el valor de factor de geometría *I* para determinar el valor de esfuerzos de contacto de los dientes

Tabla 31. Numero de esfuerzos de contacto del tren de engranajes del sistema de dosificación

Numero de engranaje	Numero de esfuerzos contacto (<i>psi</i>)
piñón motor	$0,5 * 10^{-9}$
1er engranaje	$0,2 * 10^{-9}$
2do piñón	$0,8 * 10^{-9}$
2do engranaje	$0,3 * 10^{-9}$
3er piñón	$2,4 * 10^{-9}$
3er engranaje	$0,7 * 10^{-9}$
4to piñón	$10,2 * 10^{-9}$
4to engranaje	$2,2 * 10^{-9}$
5to piñón	$56,7 * 10^{-9}$
5to engranaje	$10 * 10^{-9}$
6to piñón	$383,8 * 10^{-9}$
6to engranaje	$58 * 10^{-9}$
7mo piñón	$3041 * 10^{-9}$
7mo engranaje	$438,5 * 10^{-9}$
Piñón accionamiento	1,7526

Fuente: Autores

A continuación se determina si el material seleccionado filamento PETG en el que se fabricaran los piñones y engranajes es el adecuado para soportar los esfuerzos flexionantes y resistencia de picado para esto se seleccionara el piñón con el numero flexionante más alto ya que este elemento tiene que soportar el mayor esfuerzo que es el esfuerzo de contacto $s_c = 1,7526psi$ en los dientes con un factor de confiabilidad $K_R = 1,5$, que tenga una vida útil $L = 10000horas$, el piñón gira a una velocidad de rotación de $n = 0,00125rpm$ y un ciclo de carga por revolución $q = 1$. Se usa la siguiente expresión para determinar el número de ciclos por carga.

$$N_c = 60 * L * n * q \quad Ec. 44$$

Obteniendo el siguiente resultado,

$$N_c = 750 \text{ ciclos}$$

Con este valor se determina el factor de ciclo por esfuerzos $Z_N = 0,5$, además se considera un factor de seguridad de $SF = 1,5$ y una relación de dureza $C_H = 1$. Con la siguiente expresión se determina el esfuerzo de diseño flexionante.

$$s_{ac} = \frac{K_R * SF}{Z_N * C_H} * s_c \quad Ec. 45$$

Obteniendo el siguiente resultado $s_{ac} = 7,8867psi$

Se concluye que el filamento de PETG es adecuado para soportar el esfuerzo de flexión y resistencia a picadura que actúan sobre los dientes de los engranajes debido a que tienen una resistencia a flexión de $9956,34 psi$.

4.2.4 Diseño de ejes para los engranajes del sistema de dosificación

En el tren de transmisión del sistema de dosificación no se aplican par torsional sobre los puntos de un eje y los momentos flexionantes son igual a cero o muy bajos, frecuentemente están sujetos a fuerzas cortantes verticales importantes (Mott et al., 2006) que serían en este caso las que rigen el análisis de diseño esto sucede cuando un cojinete soporta un extremo del eje y en esa parte del eje no transmite par torsional alguno.(Mott, 2006a)

Por lo que se debe determinar el diámetro mínimo de un eje cilíndrico que soporte fuerzas cortantes que actúan sobre el eje.

$$D = \sqrt{\frac{2,94K_t(V)N}{s_n'}}$$

Donde,

K_t = concentración de esfuerzos, es igual a 1 ya que los ejes no poseen discontinuidades geométricas que produzcan concentración de esfuerzos. (Mott, 2006a)

V = fuerza cortante vertical es el valor de la fuerza radial que actúa sobre los dientes de los engranajes en este caso se escoge el valor de referencia la fuerza radial más alto de todos los engranajes. (Mott, 2006a)

N = factor de diseño tendrá un valor de 2 que es el valor de factor de diseño para elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño. (Mott et al., 2006)

s_n' = resistencia a la fatiga es la resistencia que tiene el material en el que se van a fabricar los ejes. Debido a que no se conoce la resistencia a la fatiga del filamento PETG se realizara un estimado multiplicando el valor de resistencia a la tracción por 0,4 dando el siguiente resultado,

$$s_n' = 7251,88psi * 0,4 = 2900psi$$

Con todos estos valores se obtiene el valor del diámetro mínimo del eje.

$$D = 39,768 *^{-6} in$$

Se concluye que el eje seleccionado $D = 0,1535in$ es el adecuado para ser montado en los rodamientos F688ZZ además de soportar las cargas que actúan sobre el eje.

4.2.5 Selección de rodamientos

Se seleccionarán los rodamientos que puedan soportar cargas radiales y de empuje que transmiten los engranajes helicoidales. Para esto se establecerán los valores más altos de las fuerzas que actúan sobre los engranajes, fuerza radial $W_r = 780 * 10^{-9} lbf$ y fuerza axial

o de empuje $W_x = 32,54 * 10^{-9} lbf$ obtenidos de la tabla 24. Este proceso de selección se realizará aplicando la Ec. 31.

$$P = VXR + YT$$

Donde,

P = carga equivalente

V = factor por rotación será igual a $V = 1$

R = carga radial aplicada $W_r = 780 * 10^{-9} lbf$

X = factor radial $X = 0,56$

$$P = 436,8 * 10^{-9} lbf$$

Luego de calcula la capacidad de carga dinámica C utilizando el factor de velocidad $f_N = 1,5$ y el factor por duración $f_l = 2,7$ obtenidos de la figura 14-12 de (Mott, 2006a). la capacidad de carga dinámica se calcula mediante la siguiente expresión,

$$C = P * \frac{f_l}{f_N}$$

$$C = 786,24 * 10^{-9} lbf$$

Se concluye que el rodamiento seleccionado Rodamiento F688ZZ es satisfactorio para soportar las cargas aplicadas al tener una capacidad de carga dinámica $C = 281,6 lbf$.

4.3 Diseño de los elementos mecánicos que controlan la distancia entre el colector y la aguja

Como la distancia entre la aguja y el colector es una de variables que se deben controlar durante el proceso de electrohilado, es necesario implementar un mecanismo que permita establecer varias distancias y además que cumplan con los requerimientos necesario para un óptimo funcionamiento del equipo durante el proceso de electrohilado permitiendo obtener membranas con características y propiedades óptimas.

Las piezas que se van a desplazar son los elementos que componen el conjunto colector, por lo que hay que diseñar un mecanismo que pueda soportar el peso de estas piezas. Para el desplazamiento se dispondrá de dos vigas cilíndricas por lo que se debe determinar el diámetro mínimo que pueda soportar las cargas a las que están expuestas.

La principal variable que se tendrá en cuenta para el cálculo del diseño será masa del conjunto colector se propondrá el valor $m = 1,5kg$. Al utilizar la ecuación

$$F = m * g$$

Se obtendrá la fuerza que actúa sobre las dos vigas cilíndricas

$$F = 14,715N$$

Debido a que son dos vigas la fuerza se repartiría en 2 artes iguales quedando para cada viga el valor de $F = 7,3575N$. Ya teniendo la fuerza que actúa sobre cada viga se procede a determinar el esfuerzo cortante mediante la ecuación especial de esfuerzo cortante,

$$\tau_{max} = \frac{4V}{3A}$$

$$V = 7,3575N$$

$$D = 12mm = 0,012m$$

$$A = 1,13 * 10^{-4}m^2$$

$$\tau_{max} = 86814,16Pa = 86,814kPa$$

Se concluye que el material de fabricación PETG es adecuado para la fabricación de las vigas ya que la tensión máxima de este material es de $\tau_{max} = 50MPa$.

4.4 Análisis de resultados del diseño

La selección de material PETG para la fabricación de los engranajes propuestos para transmitir el movimiento de los motores eléctricos hacia el colector y al mecanismo de accionamiento del sistema de dosificación de la solución polimérica, cumple con gran satisfacción los requerimientos de diseño como lo es resistencia a contacto o picadura y resistencia a los esfuerzos de flexión a los que están expuestos los dientes de cada engranaje con factores de confiabilidad de 1,5 y un factor de seguridad de 1,5. Garantizando así un correcto funcionamiento de cada sistema. Adicionalmente este material es el adecuado para la fabricación de ejes de los engranajes al tener una resistencia mucho mayor a la que están sometidas estas piezas durante el funcionamiento y garantizan la fabricación de las demás piezas que componen el prototipo de la máquina de electrohilado al no estar sometidas a esfuerzos considerables.

La elección de los rodamientos F688ZZ son adecuados para soportar las cargas radiales y axiales al mismo tiempo que actúan sobre los engranes helicoidales debido a que la carga dinámica que debe soportar es muy baja a la que soporta el rodamiento.

5. CONSTRUCCION DEL EQUIPO DE ELECTROHILADO

El equipo de electrohilado se construirá con base a los parámetros determinados durante el proceso de diseño respetando las variables con las que se realizaron los cálculos que permiten validar y garantizar el correcto funcionamiento y durabilidad de los elementos de cada sistema. A continuación, se describen los elementos más importantes que se tuvieron para la construcción y ensamble de las piezas.

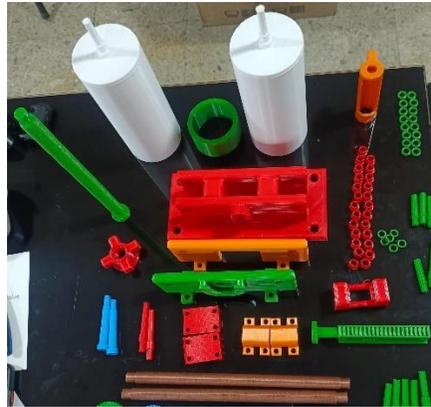
5.1 Fabricación de piezas por impresión 3D

Se diseñarán los engranajes en software Inventor 2019 con las propiedades de los engranajes, ejes, soportes y demás piezas, determinados en el capítulo 4. Debido a que con estos parámetros garantizan, el correcto funcionamiento de los diversos elementos que componen el prototipo de la máquina de electrohilado. Para luego proceder con la fabricación de cada una de las piezas por impresión 3D. pero se deben tener en cuenta algunos factores durante este proceso como es la calidad de las piezas ya que se pueden imprimir piezas con un bajo porcentaje de calidad que implica una reducción en la cantidad de material para la fabricación de una pieza, pero afecta directamente en las propiedades físicas y mecánicas de cada elemento por esta razón la impresión de la piezas se realizaran con un 80% de calidad permitiendo así ahorrar material y sin afectar considerablemente las propiedades físicas y mecánicas de las piezas.

Otro de los factores importantes es la temperatura en la que se esta fundiendo el filamento durante el proceso de impresión ya que se debe garantizar una temperatura adecuada en la que el filamento se funda mezclándose con las demás capas finas de la pieza, al tener deficiencias en la temperatura de fundición ocasiona acabados superficiales

inadecuados, deformación de las piezas y deficiente mezcla homogénea entre capas. Teniendo en cuenta los factores ya descritos se obtienen las piezas mostradas en la siguiente figura 18.

Figura 18. Piezas fabricadas por impresión 3D



Fuente: Autores

5.2 Fabricación de soportes de mecanismos del colector y sistema de dosificación

El diseño de los soportes en los que se ubican los rodamientos, ejes de engranajes, engranajes y demás piezas. se deben respetar parámetros que influye directamente en correcto funcionamiento de los mecanismos como la distancia entre centros de cada par de engranajes para impedir la interferencia entre dientes, además de la correcta alineación de los orificios de una base con respecto a la otra para que los ejes de los engranajes queden perpendiculares a los soportes. Por esta razón se diseñaron estos soportes en software inventor con las dimensiones adecuadas y al utilizar acrílico de 8 mm de espesor se realizaron los orificios y cortes necesarios por medio de un equipo de corte laser que permite realizar cortes con margen de error bajos. En la figura se observa uno de los soportes con los orificios y cortes realizados por corte laser.

Figura 19. Soporte con corte laser



Fuente: Autores

5.3 Ensamble de piezas

Ya teniendo las piezas fabricadas por impresión 3D y los soportes en los que se van a ubicar las piezas se realiza el proceso de ensamblaje teniendo las precauciones de que las piezas queden correctamente instaladas, además se fijaran los soportes con tornillos para impedir el des alineamiento de las piezas móviles obteniendo así los conjuntos de mecanismos que controlan las diversas variables que influyen en la obtención de membranas de PLA. Uno de los ensamblajes ya terminados se observará en la figura 20.

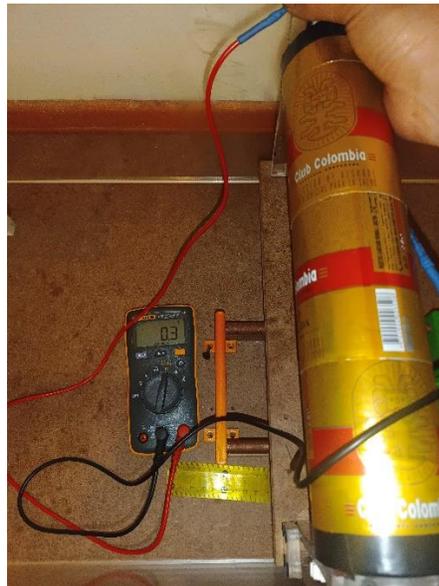
Figura 20. Conjunto ensamblado del sistema de dosificación



Fuente: Autores

Una vez terminado el ensamblaje se procede con la conexión eléctrica de los diversos dispositivos electrónicos y motores, que permiten y ejecutan el movimiento de los elementos móviles, además que se debe garantizar la continuidad eléctrica de la superficie del colector hasta el porta escobillas, esto se realiza mediante la conexión de cable de cobre que está haciendo contacto con las superficie interna de las latas de cerveza de aleación de aluminio. Ara comprobar la continuidad eléctrica se utiliza un multímetro en modo ohmniometro midiendo así la resistencia eléctrica desde la superficie del hasta el cable de salida del porta escobillas dando el valor de 0,3 ohm que es valor ideal para una excelente conductividad eléctrica permitiendo el paso de corriente eléctrica de la fuente de alto voltaje.

Figura 21. Conductividad eléctrica colector



Fuente: Autores

6. PRUEBAS FUNCIONALES

Luego de construir el prototipo se procede a realizar pruebas funcionales validando el funcionamiento de cada sistema. Con las siguientes limitaciones:

- No se cuenta con una fuente de alto voltaje (10kV a 50kV) que permita realizar pruebas funcionales en las que se puedan obtener membranas de PLA, por el alto valor económico que tiene este dispositivo.
- No se dispone de material base pellets de PLA, solvente 2,2,2 trifluoruroetanol, debido a que son insumos muy difíciles de adquirir y de alto costo económico.
- No se cuenta con instalaciones de laboratorio en el que se puedan realizar disoluciones y análisis de resultados en la obtención de membranas de PLA.

Al tener en cuenta estas limitaciones se realizan unas series de pruebas funcionales validando algunos factores del prototipo de un equipo de electrohilado.

Para el colector se tuvieron en cuenta las diversas velocidades de giro del colector que se pueden obtener variando la posición de giro de la perilla del módulo PWM. Adicionalmente se validó el correcto funcionamiento de este mecanismo realizando 3 pruebas funcionales en las que se modificaba la velocidad de giro y se mantenía constante durante cierto tiempo sin evidenciar anomalías durante el proceso funcionamiento.

Una de estas pruebas fue la de mantener al colector a la velocidad máxima de giro que disponía el motor eléctrico (5200rpm) durante 1 hora continua de funcionamiento en las que el mecanismo mantuvo su funcionamiento, pero con una serie de vibraciones causadas

por el desbalanceo del colector al estar ensamblado por dos secciones y unido por un buje en la parte central.

Al sistema de corredera se realizaron varias pruebas en la que se modificaban las distancias entre la aguja de dosificación y el colector observando un correcto desplazamiento del mecanismo.

Para el sistema de dosificación se simuló el funcionamiento del mecanismo de accionamiento de la jeringa sustituyendo en forma práctica la solución polimérica por los siguientes fluidos:

Leche: que tiene una densidad normal de entre $\rho = 1,028 \text{ a } \frac{1,033 \text{ g}}{\text{cm}^3}$

Vinagre blanco: tiene una densidad promedio de $\rho = 1,00056 \text{ g/cm}^3$

Se realizan 2 pruebas funcionales para cada uno de estos fluidos modificando la velocidad de giro del motor obteniendo de esta manera un cambio en la velocidad de salida del fluido y comprobando que el mecanismo funciona sin ningún tipo de restricción mecánica.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

El diseño de los elementos móviles como lo son los engranajes, ejes, rodamientos que están sometidos a diversas cargas y esfuerzos permitieron garantizar que el material de fabricación de las piezas filamento PETG cumple satisfactoriamente los requerimientos de diseño que garantizan el correcto funcionamiento y durabilidad de cada sistema.

El funcionamiento del prototipo de una máquina de electrohilado cumple en su mayor parte con los requerimientos necesarios que permiten obtener membranas de PLA, el factor que se debe considerar y que afectaría en corto tiempo la vida útil de los mecanismos es la vibración presentada por el desbalanceo del colector.

CONCLUSIONES

En el estudio de los parámetros que se realizaron indicaron que hay variables muy importantes que influyen directa e indirectamente en el proceso de electrohilado y por esta razón se debieron implementar parámetros que cumplieron con el correcto funcionamiento del equipo de electrohilado y permitan obtener membranas electrohiladas de ácido Poliláctico.

El diseño de cada uno de elementos que componen el equipo de electrohilado permitieron controlar adecuadamente las variables más importantes como lo es el flujo de la solución polimérica, velocidad de giro del colector cilíndrico y la trayecto que hay entre la aguja y el colector. Además de garantizar confiabilidad con respecto a la resistencia del material seleccionado para la fabricación de los elementos que se encuentran sometidos a diferentes fuerzas y esfuerzos que actúan sobre cada una de estas piezas.

La construcción y ensamblaje del prototipo permitieron validar en la etapa practica la correcta selección de las variables que se tuvieron en cuenta para el funcionamiento del prototipo del equipo de electrohilado con base a las variables de diseño determinadas.

Las pruebas funcionales realizadas garantizan el correcto funcionamiento de los mecanismos del prototipo para la obtención de membranas electrohiladas.

ANEXOS

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO Y MANIPULACIÓN

PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA DE ELECTROHILADO PARA LA OBTENCIÓN DE MEMBRANAS DE ÁCIDO POLI-LÁCTICO (PLA)



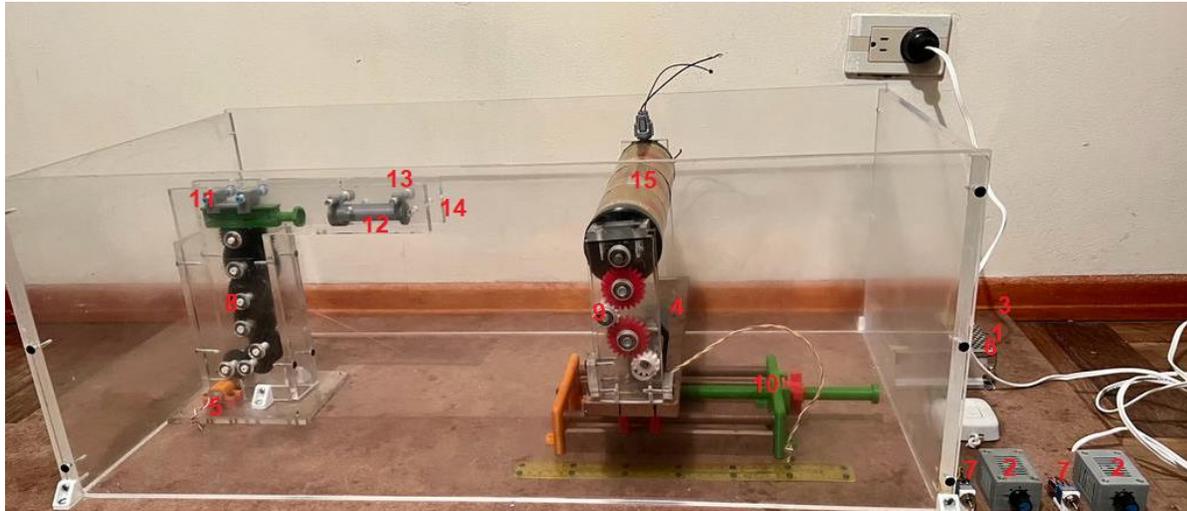
Nota:



Antes de realizar cualquier tipo de manipulación e intervención es necesario leer el presente manual para evitar riesgos al operario y o daños del prototipo.

1. Componentes del prototipo

El prototipo de máquina de electrohilado está conformado por diferentes componentes y partes las cuales en conjunto hacen posible llevar a cabo el proceso de electrohilado, estos componentes son:



N°	CANT	Nombre del componente
1	1	Fuente de alto voltaje
2	2	Módulo PWM variador de velocidad Motores DC 6V~28V.
3	1	Fuente Conmutada de Voltaje 12V - 10A - 120W DC
4	1	Motor eléctrico 5000 RPM (12V)
5	1	Motoreductor 4 Kg*cm - 100 RPM (12V)
6	1	Convertor DC-DC Step Down 0.8V~25V 3A Reductor
7	2	Mini Sw interruptor de codillo 6 pines - 3 posiciones
8	1	Tren de engranajes mecanismo de dosificación
9	1	Tren de engranajes mecanismo giro colector
10	1	Mecanismo ajuste distancia colector – aguja
11	1	Mecanismo accionador jeringa
12	1	Porta jeringa
13	1	Jeringa
14	1	Aguja
15	1	Colector

2. Descripción del prototipo

Este es un prototipo de máquina de electrohilado la cual por medio de una fuente de alto voltaje que esta entre 0 y 20 Kv es capaz de generar fibras o membranas de ácido poli-láctico (PLA) de tamaño microscópico para diferentes aplicaciones.

3. Características

Características del prototipo	
Largo	115 cm
Ancho	55 cm
Alto	33 cm
Voltaje	110 V
Materiales/base	Madera MDF
Material estructura	Acrílico
Material/laterales	Acrílico

4. Condiciones de seguridad

4.1 Referente al prototipo

En este apartado se abordan las precauciones y medidas de seguridad que se deben tener en cuenta al momento de manipular y u operar el prototipo de máquina de electrohilado.

4.1.1 Estructura del prototipo

Dado que nos encontramos manipulando un prototipo es muy importante recalcar el cuidado y la delicadeza con la cual se manipula éste ya que su estructura es en acrílico el cual no es lo suficientemente resistente para colocar una carga sobre el o recostare sobre el prototipo este por este motivo que se prohíben este tipo de acciones, igualmente la delicadeza al momento de realizar una reubicación o desplazamiento a otro lugar de trabajo es fundamental para garantizar su correcto funcionamiento.

4.1.2 Alimentación eléctrica

Este prototipo está diseñado para trabajar con una alimentación de 110 V Lo cual hay que tenerse muy en cuenta al momento de querer operarlo, esto ayuda a la conservación del prototipo y evita daños en sus componentes eléctricos y generales del mismo.

4.1.3 Seguridad del operario

Antes realizar cualquier tipo de actividad con el prototipo es necesario que el operario tenga consigo los siguientes elementos de protección personal (EPP) y los utilice de la forma adecuada.

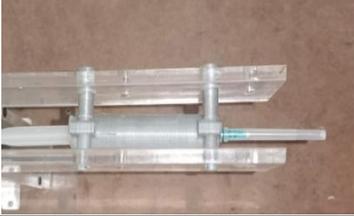
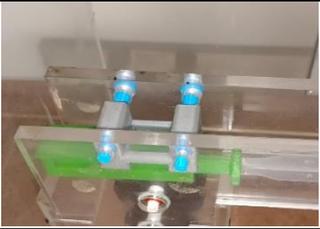
EPP necesarios para la manipulación el prototipo		
Elemento	Importancia	Ilustración
Guantes	En la manipulación de la solución polimérica es fundamental el uso de estos ya que contiene compuestos químicos los cuales son peligrosos al contacto directo con la piel.	
Lentes de Seguridad	Cuando se manipulan sustancias liquidas y mas en este caso sustancias químicas es indispensable el uso de este elemento ya que previene el contacto de alguna salpicadura de una sustancia con la vista.	
Mascarilla	En este proceso se presentan reacciones químicas las cuales producen gases nocivos para la salud al ser inhalados, es por este motivo que es de suma importancia el uso de este elemento.	

Nota:

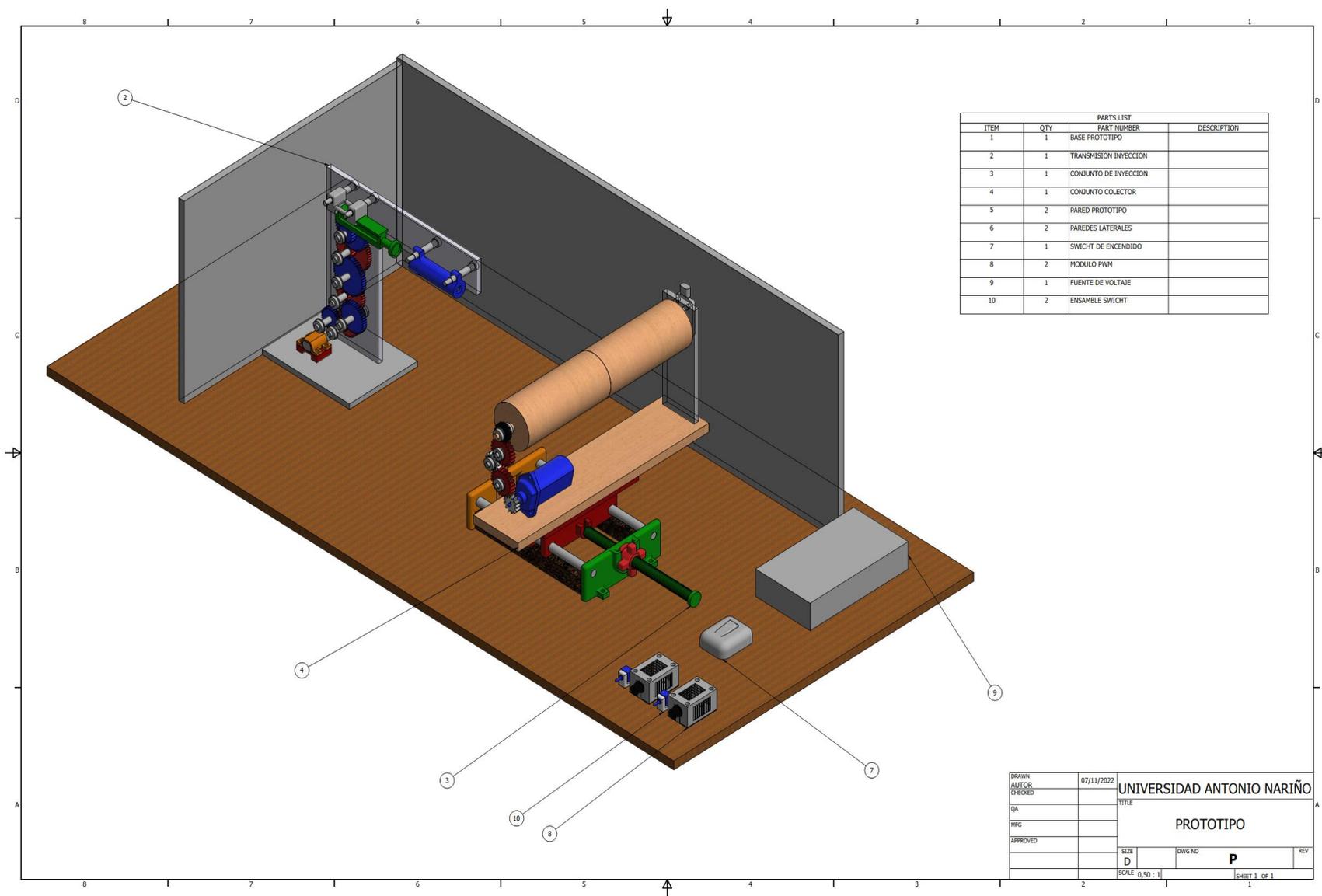
	Tener precaución con las conexiones eléctricas del prototipo, antes de realizar cualquier tipo de limpieza y o mantenimiento verifique que este desconectado de la fuente de alimentación.
---	---

5. Funcionamiento del prototipo

Guía de funcionamiento		
N°	Descripción	Ilustración
1	Colocar el prototipo sobre una superficie plana y espacio suficiente para trabajar	
2	Conecta el prototipo a la fuente de alimentación eléctrica de 110 V	
3	Definir la velocidad de giro del colector y la cantidad de flujo volumétrico de dosificación de la solución polimérica con ayuda de los módulos PWM.	
4	Definir la distancia entre el colector y la aguja con ayuda de mecanismo de distancia colector -aguja.	
5	llevar los interruptores de los motores de giro del colector y dosificación a la posición OFF	
6	Encender la fuente de voltaje de los motores de giro del colector y dosificación.	

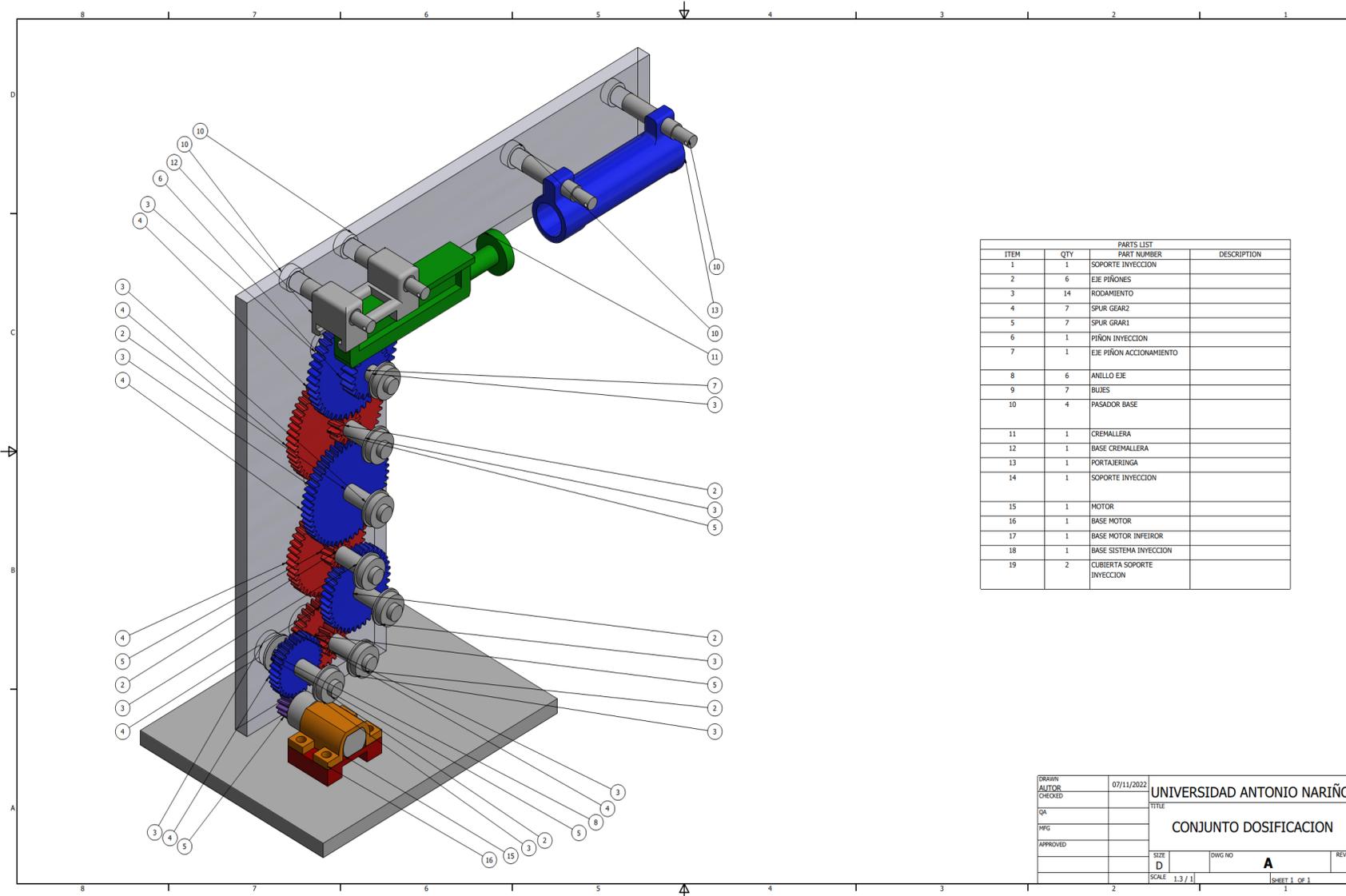
7	Instalar la jeringa con la solución polimérica en el porta jeringas.	
8	Posicionar el mecanismo de accionamiento de la jeringa con sus respectivos seguros.	
9	Conectar la terminal positiva de la fuente de alto voltaje a la aguja.	
10	Conectar el cable negativo al conector del porta escobillas del colector.	
11	Aplicar la tensión de alto voltaje.	
12	Encender el motor del sistema de dosificación de la solución polimérica	
13	Encender el motor de giro del colector	
14	Al terminar el proceso cortar la alimentación al prototipo.	

PLANOS



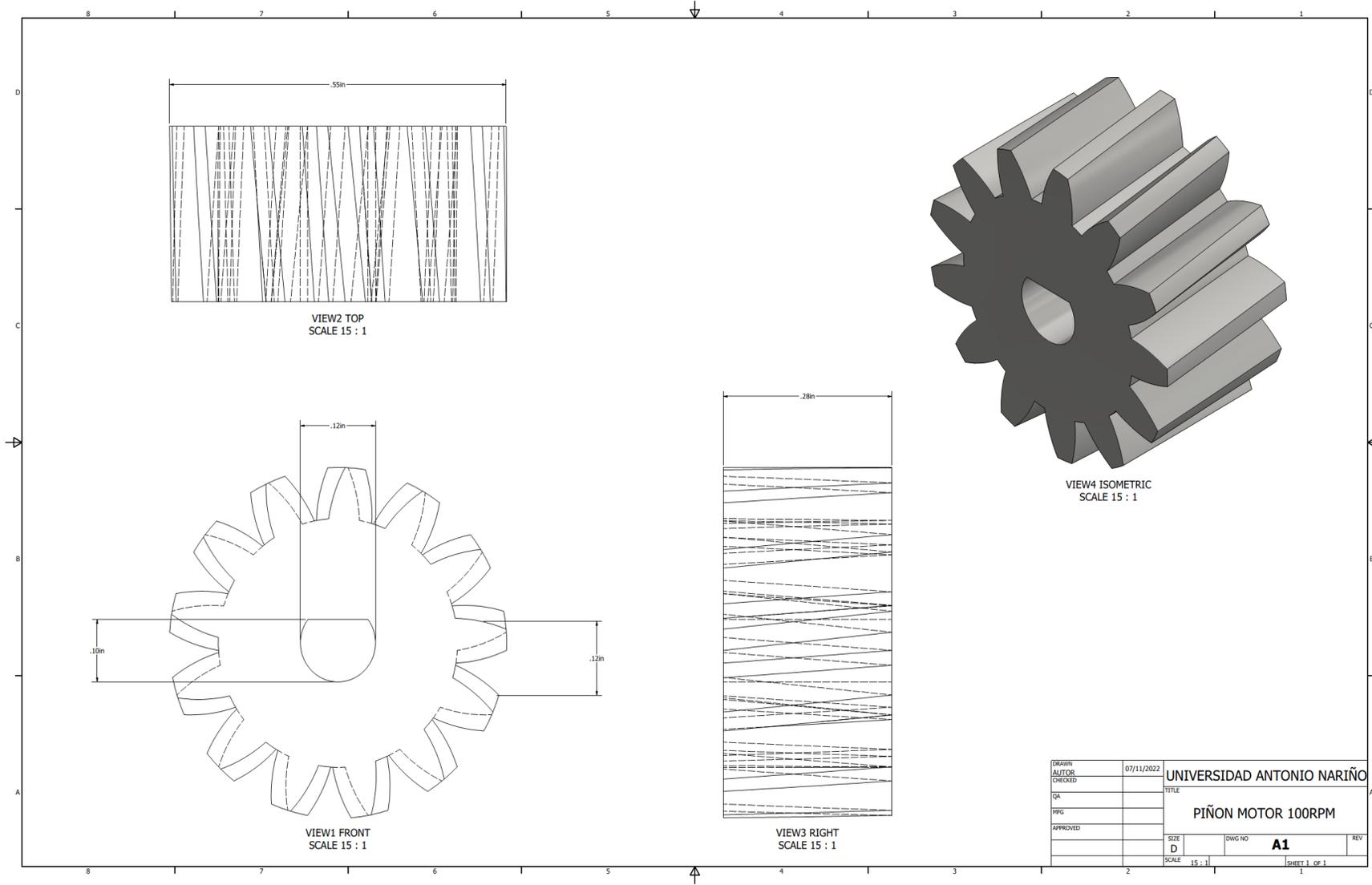
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1		BASE PROTOTIPO
2	1		TRANSMISION INYECCION
3	1		CONJUNTO DE INYECCION
4	1		CONJUNTO COLECTOR
5	2		PARED PROTOTIPO
6	2		PAREDES LATERALES
7	1		SWICHT DE ENCENDIDO
8	2		MODULO PWM
9	1		FUENTE DE VOLTAJE
10	2		ENSAMBLE SWICHT

<table border="1"> <tr> <td>DRAWN</td> <td>07/11/2022</td> </tr> <tr> <td>AUTOR</td> <td></td> </tr> <tr> <td>CHECKED</td> <td></td> </tr> <tr> <td>QA</td> <td></td> </tr> <tr> <td>WFG</td> <td></td> </tr> <tr> <td>APPROVED</td> <td></td> </tr> </table>	DRAWN	07/11/2022	AUTOR		CHECKED		QA		WFG		APPROVED		<table border="1"> <tr> <td colspan="2">UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO</td> </tr> <tr> <td colspan="2">TÍTULO</td> </tr> <tr> <td colspan="2">PROTOTIPO</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>DWG NO</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>P</td> </tr> <tr> <td>SCALE 0,50 : 1</td> <td>SHEET 1 OF 1</td> </tr> </table>	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO		TÍTULO		PROTOTIPO		SIZE	DWG NO	D	P	SCALE 0,50 : 1	SHEET 1 OF 1
DRAWN	07/11/2022																								
AUTOR																									
CHECKED																									
QA																									
WFG																									
APPROVED																									
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO																									
TÍTULO																									
PROTOTIPO																									
SIZE	DWG NO																								
D	P																								
SCALE 0,50 : 1	SHEET 1 OF 1																								

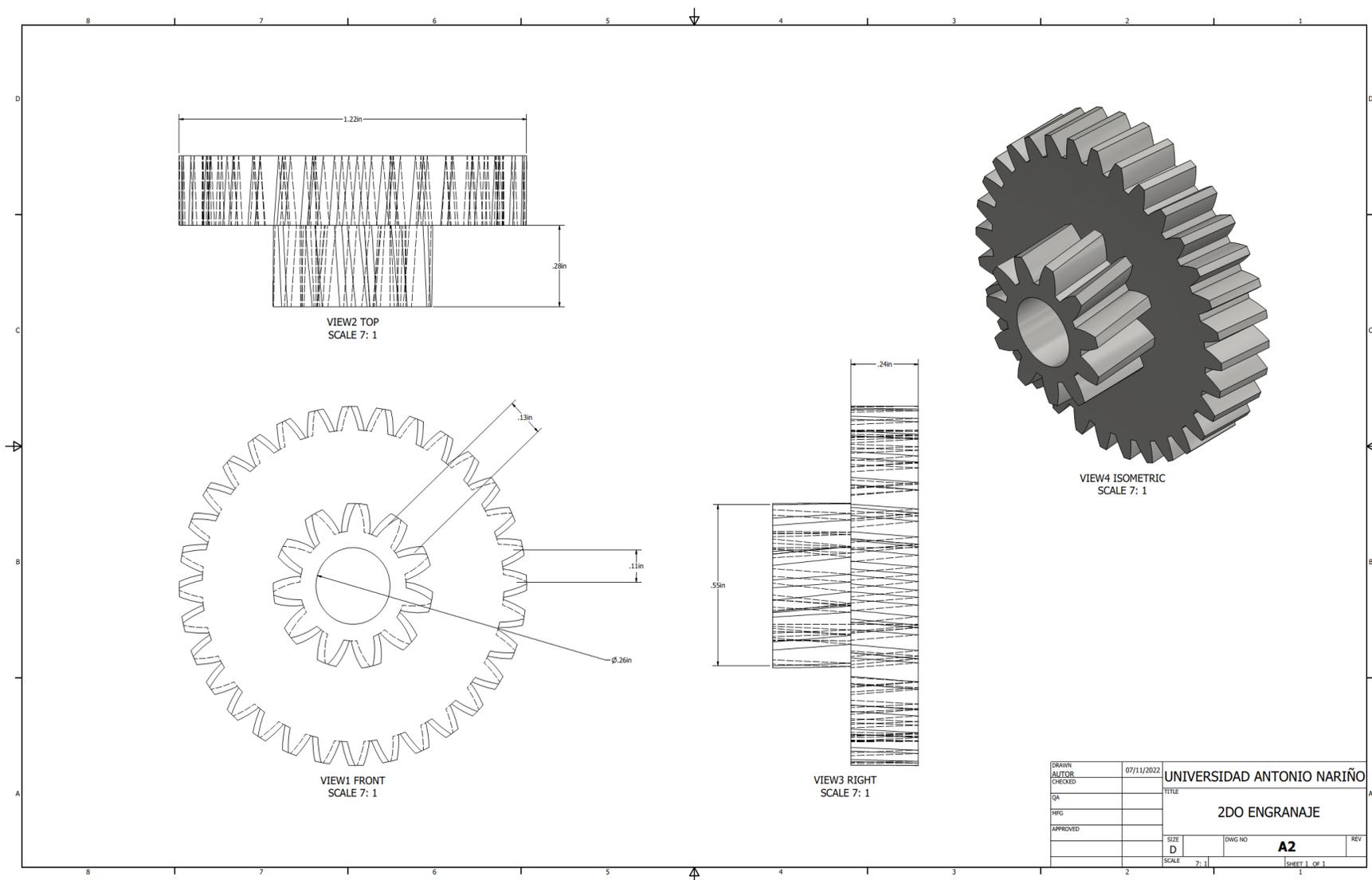


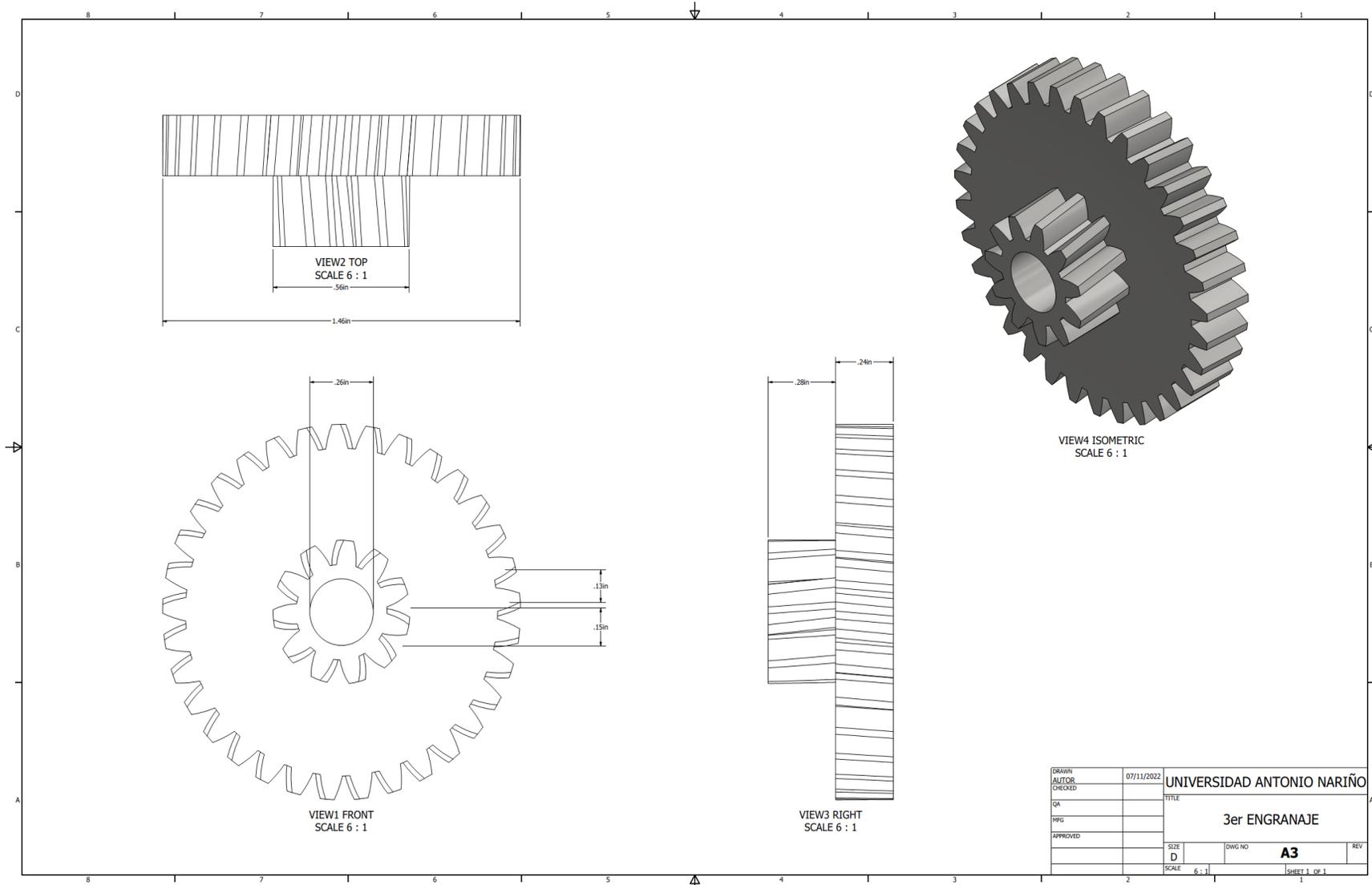
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1		SOPORTE INYECCION
2	6		EJE PIÑONES
3	14		RODAMIENTO
4	7		SPUR GEAR2
5	7		SPUR GRAR1
6	1		PIÑON INYECCION
7	1		EJE PIÑON ACCIONAMIENTO
8	6		ANILLO EJE
9	7		BUES
10	4		PASADOR BASE
11	1		CREMALLERA
12	1		BASE CREMALLERA
13	1		PORTAJERINGA
14	1		SOPORTE INYECCION
15	1		MOTOR
16	1		BASE MOTOR
17	1		BASE MOTOR INFERIOR
18	1		BASE SISTEMA INYECCION
19	2		CUBIERTA SOPORTE INYECCION

DRAWN: AUTOR: CHECKED: QA: DWG: APPROVED:	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO TITULO: CONJUNTO DOSIFICACION
SIZE: D	DWG NO: A	REV:
SCALE: 1.3 / 1	SHEET 1 OF 1	

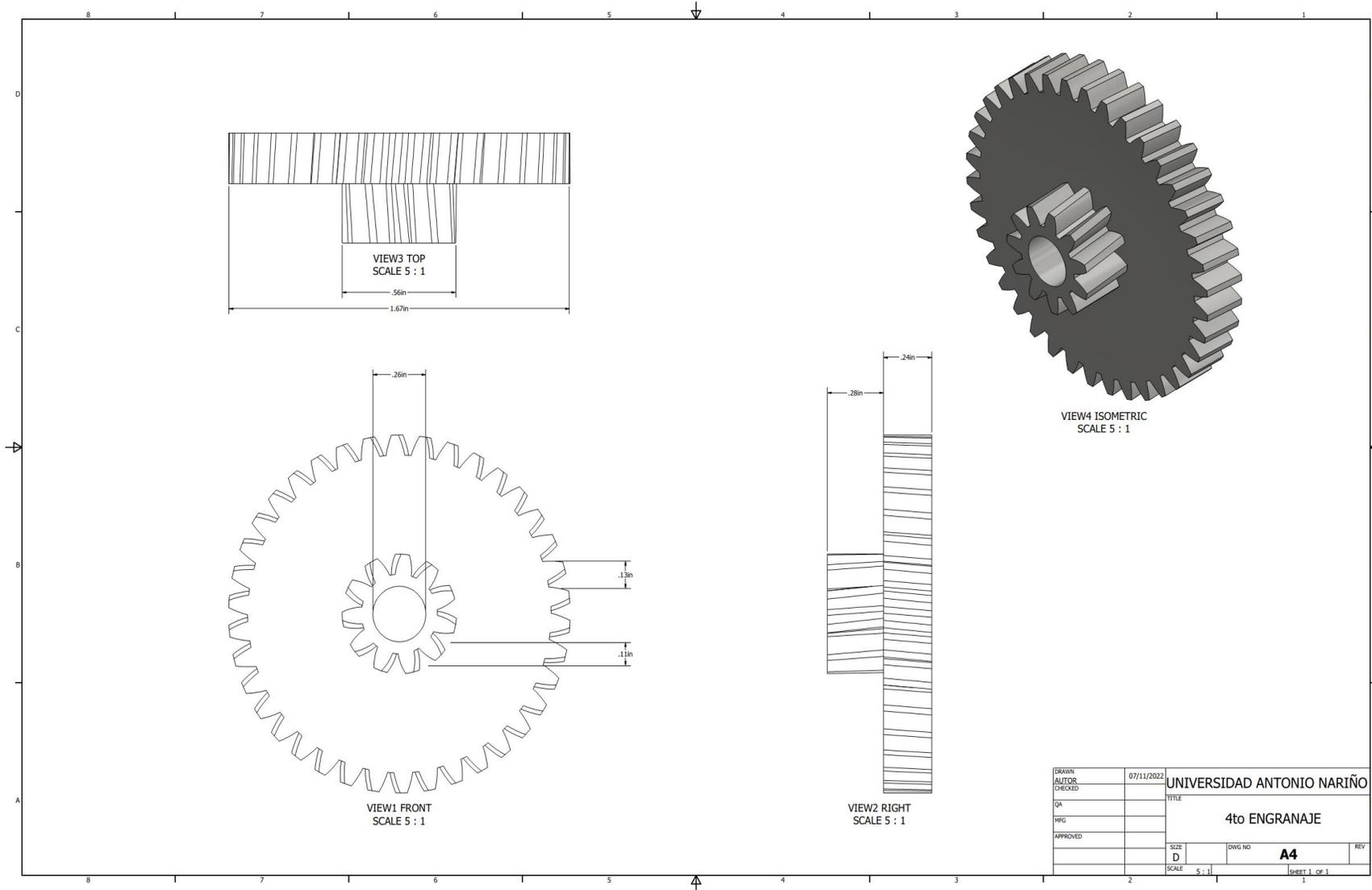


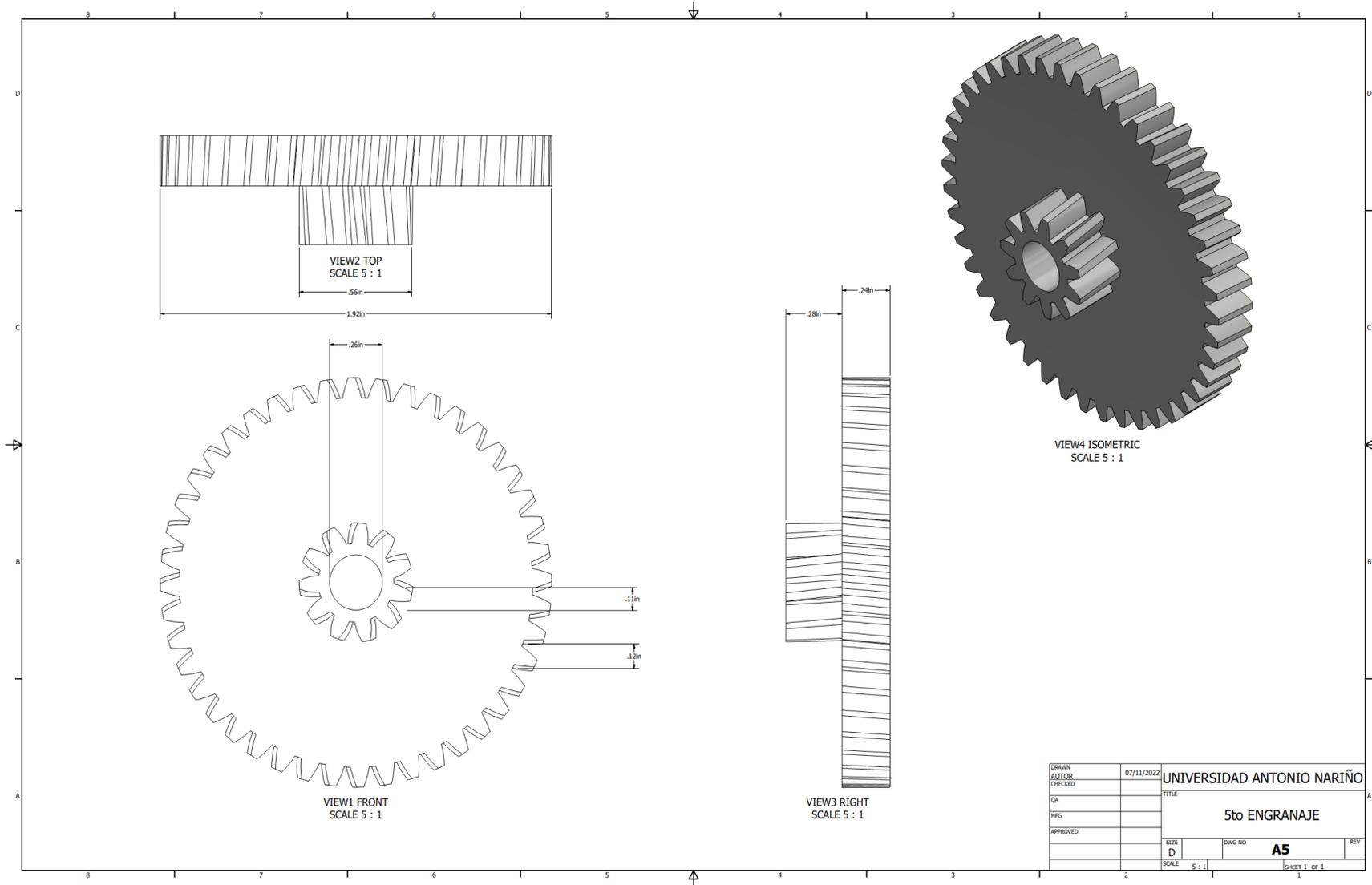
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		PIÑON MOTOR 100RPM	
QA		SIZE	DWG NO
MPG		D	A1
APPROVED		SCALE	15 : 1
		SHEET 1 OF 1	

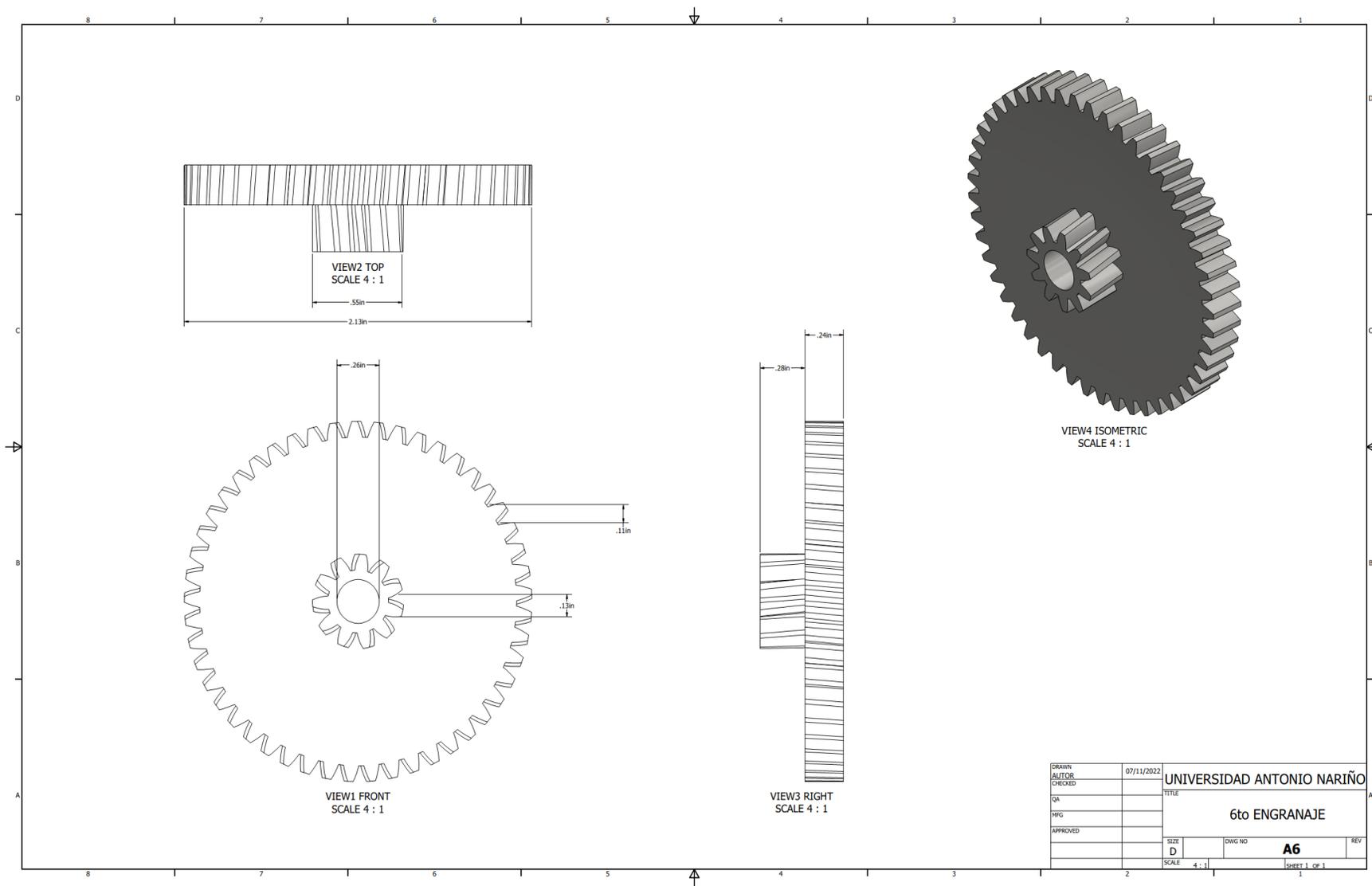




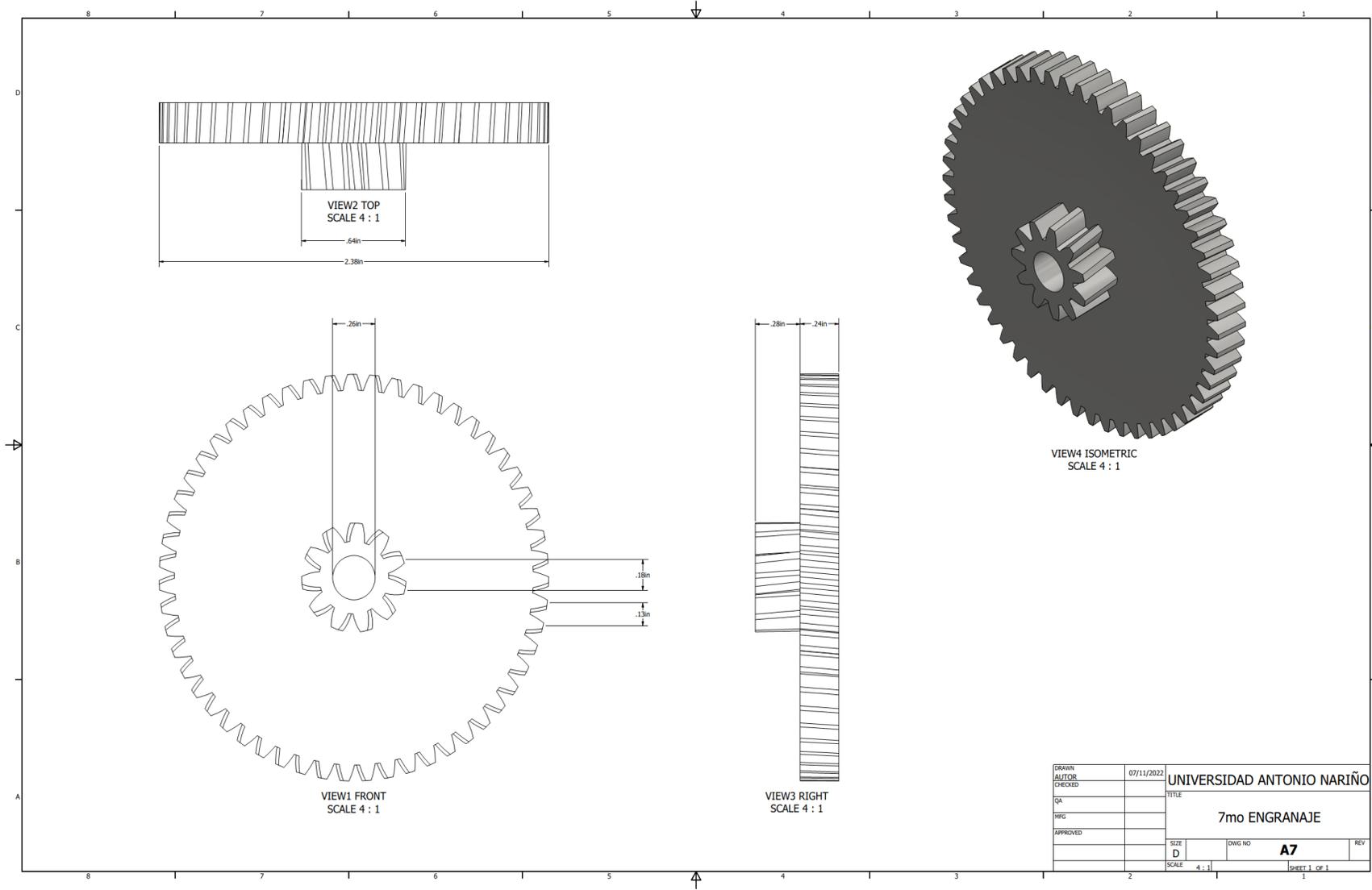
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		3er ENGRANAJE	
QA		SIZE	DWG NO
PRG		D	A3
APPROVED		SCALE	REV
		6 : 1	1
			SHEET 1 OF 1



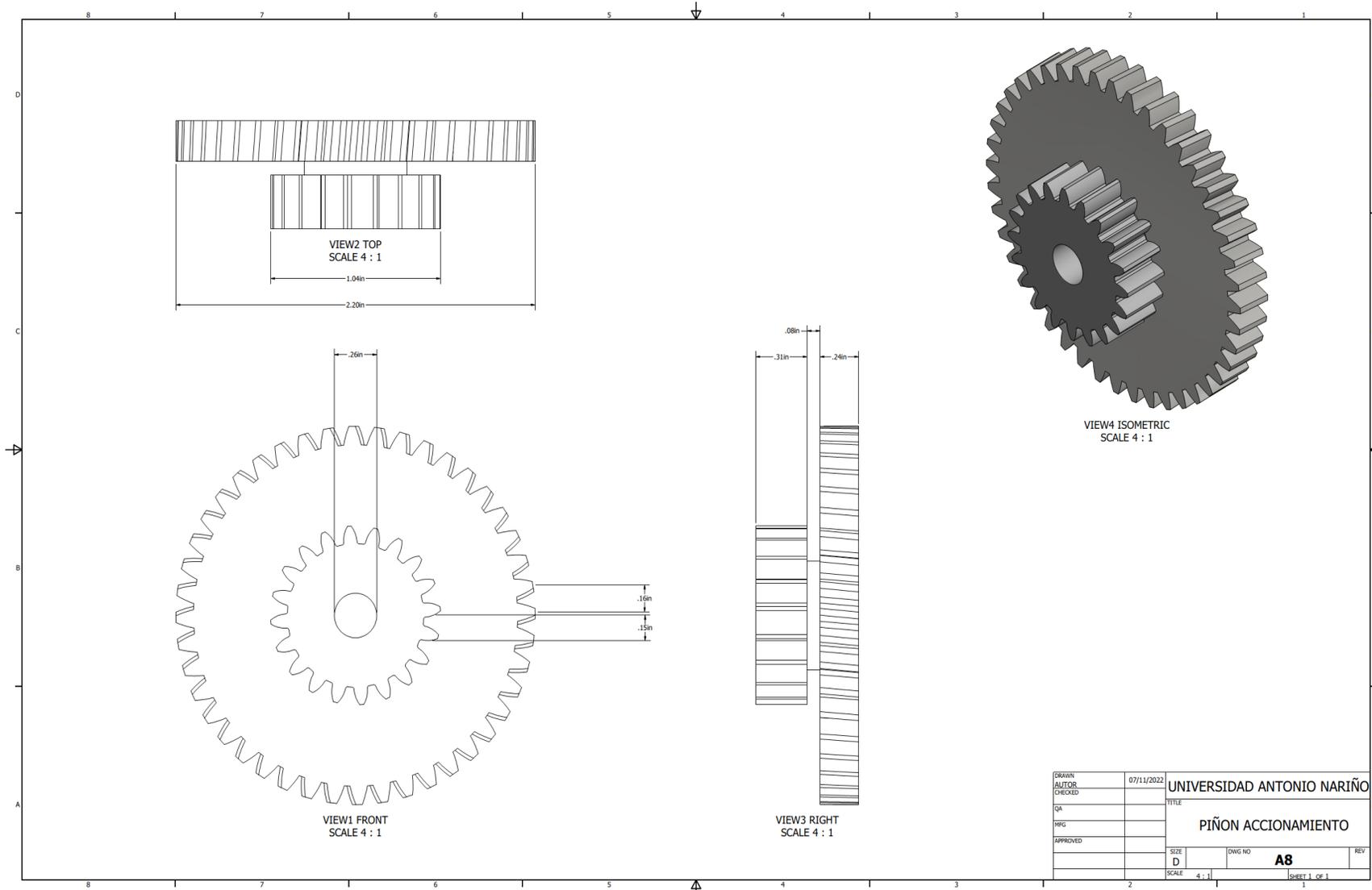




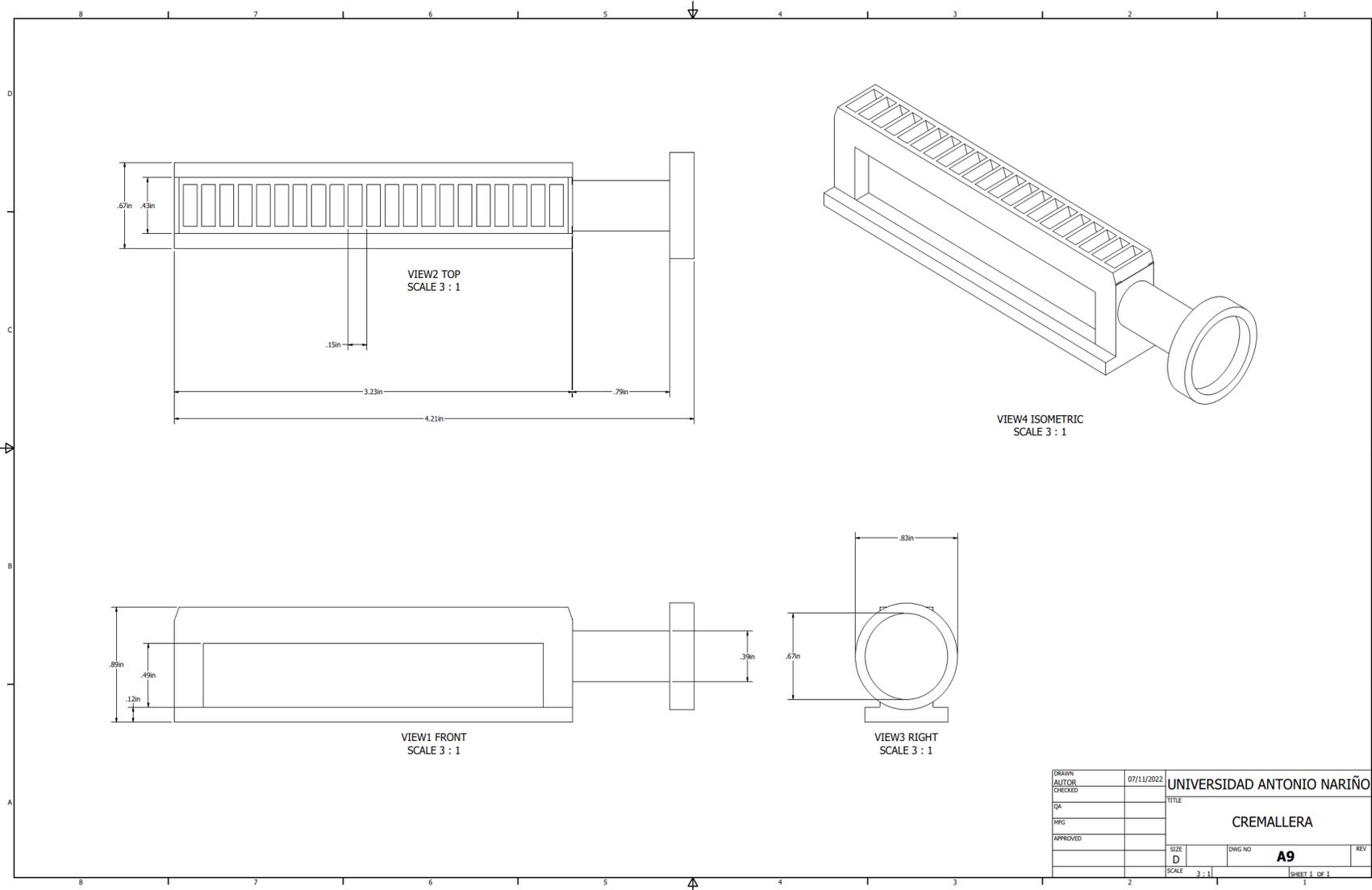
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		6to ENGRANAJE	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	A6
APPROVED		SCALE	4 : 1
		SHEET 1 OF 1	



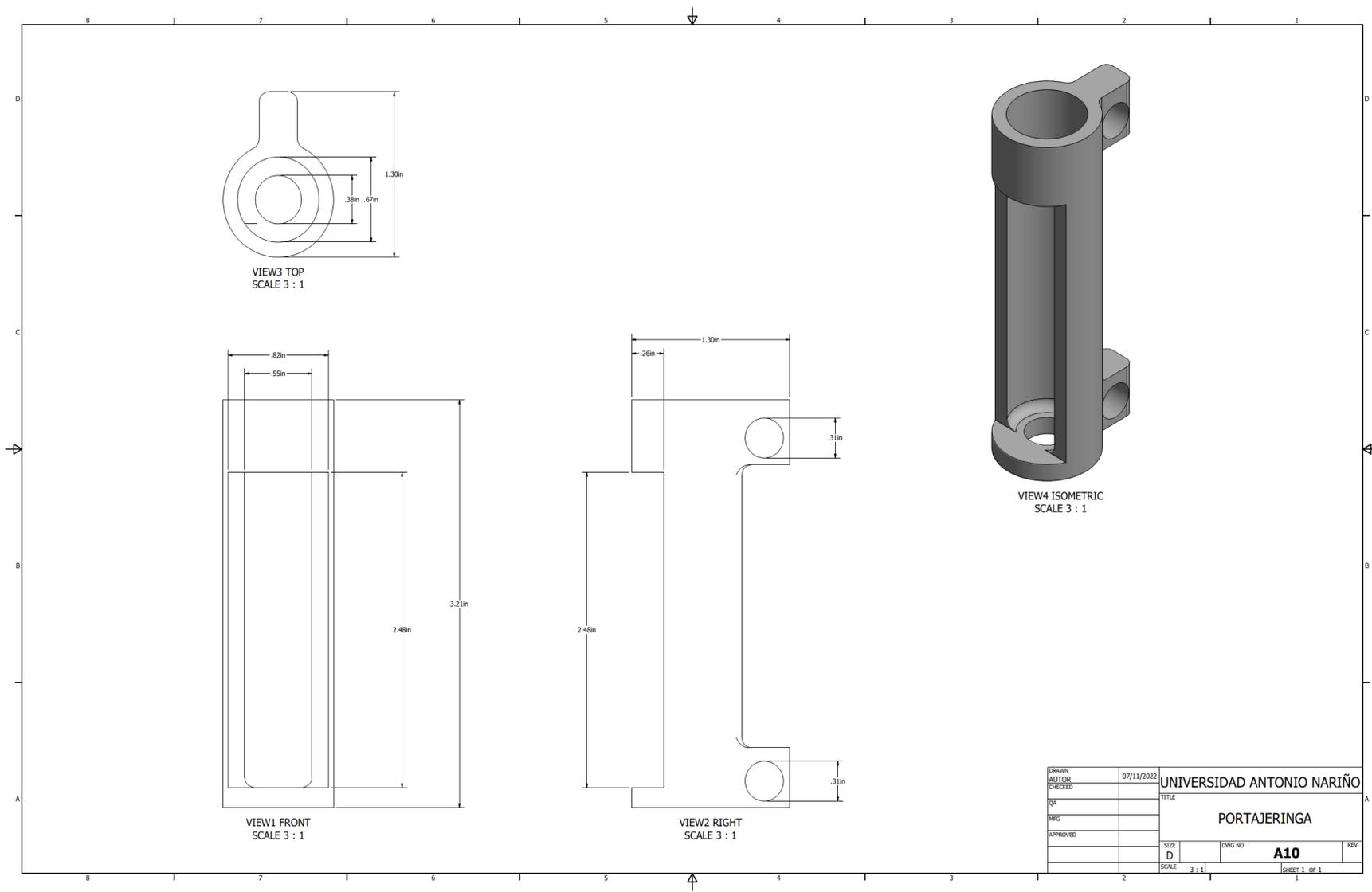
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		7mo ENGRANAJE	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	A7
APPROVED		SCALE	REV
		4 : 1	1 OF 1

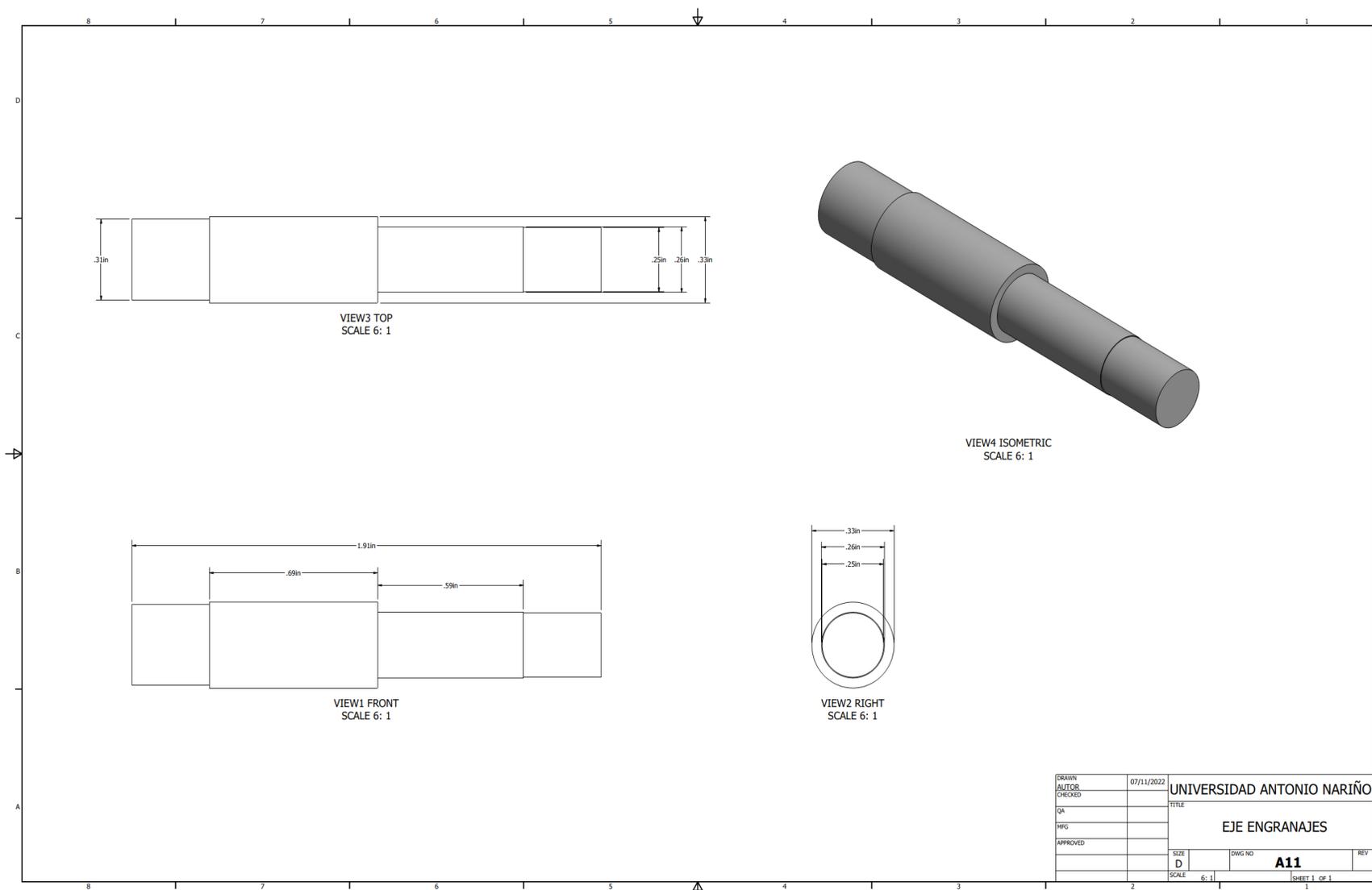


DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		PIÑON ACCIONAMIENTO	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	A8
APPROVED		SCALE	REV
		4 : 1	1
			SHEET 1 OF 1

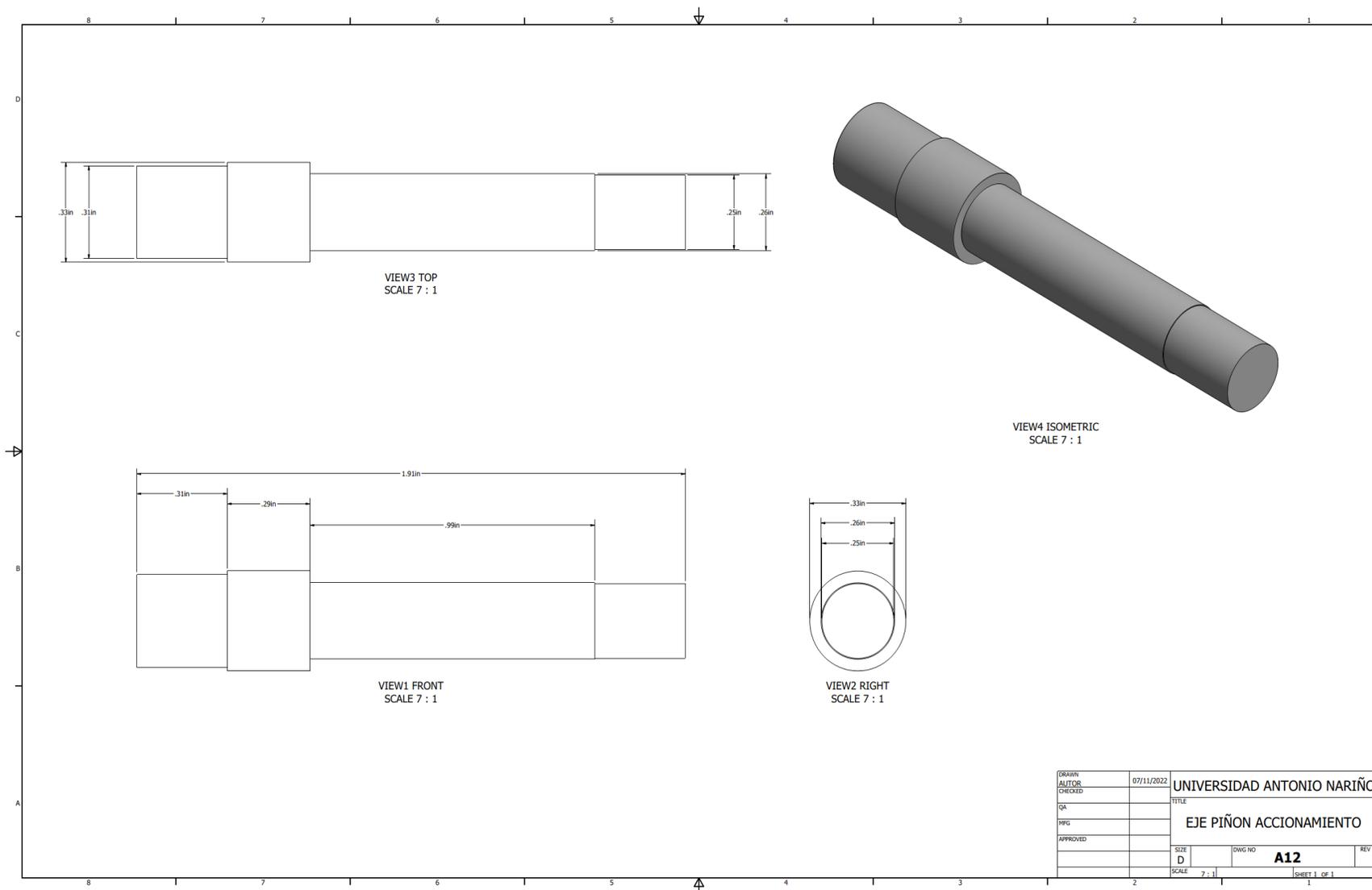


<table border="1"> <tr><td>DRAWN</td><td>07/11/2022</td></tr> <tr><td>AUTOR</td><td></td></tr> <tr><td>CHECKED</td><td></td></tr> <tr><td>QA</td><td></td></tr> <tr><td>WFG</td><td></td></tr> <tr><td>APPROVED</td><td></td></tr> </table>	DRAWN	07/11/2022	AUTOR		CHECKED		QA		WFG		APPROVED		<table border="1"> <tr><td colspan="2">UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO</td></tr> <tr><td colspan="2">TITLE</td></tr> <tr><td colspan="2">CREMALLERA</td></tr> <tr> <td>SIZE D</td> <td>DWG NO A9</td> <td>REV</td> </tr> <tr> <td>SCALE 3 : 1</td> <td colspan="2">SHEET 1 OF 1</td> </tr> </table>	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO		TITLE		CREMALLERA		SIZE D	DWG NO A9	REV	SCALE 3 : 1	SHEET 1 OF 1	
DRAWN	07/11/2022																								
AUTOR																									
CHECKED																									
QA																									
WFG																									
APPROVED																									
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO																									
TITLE																									
CREMALLERA																									
SIZE D	DWG NO A9	REV																							
SCALE 3 : 1	SHEET 1 OF 1																								

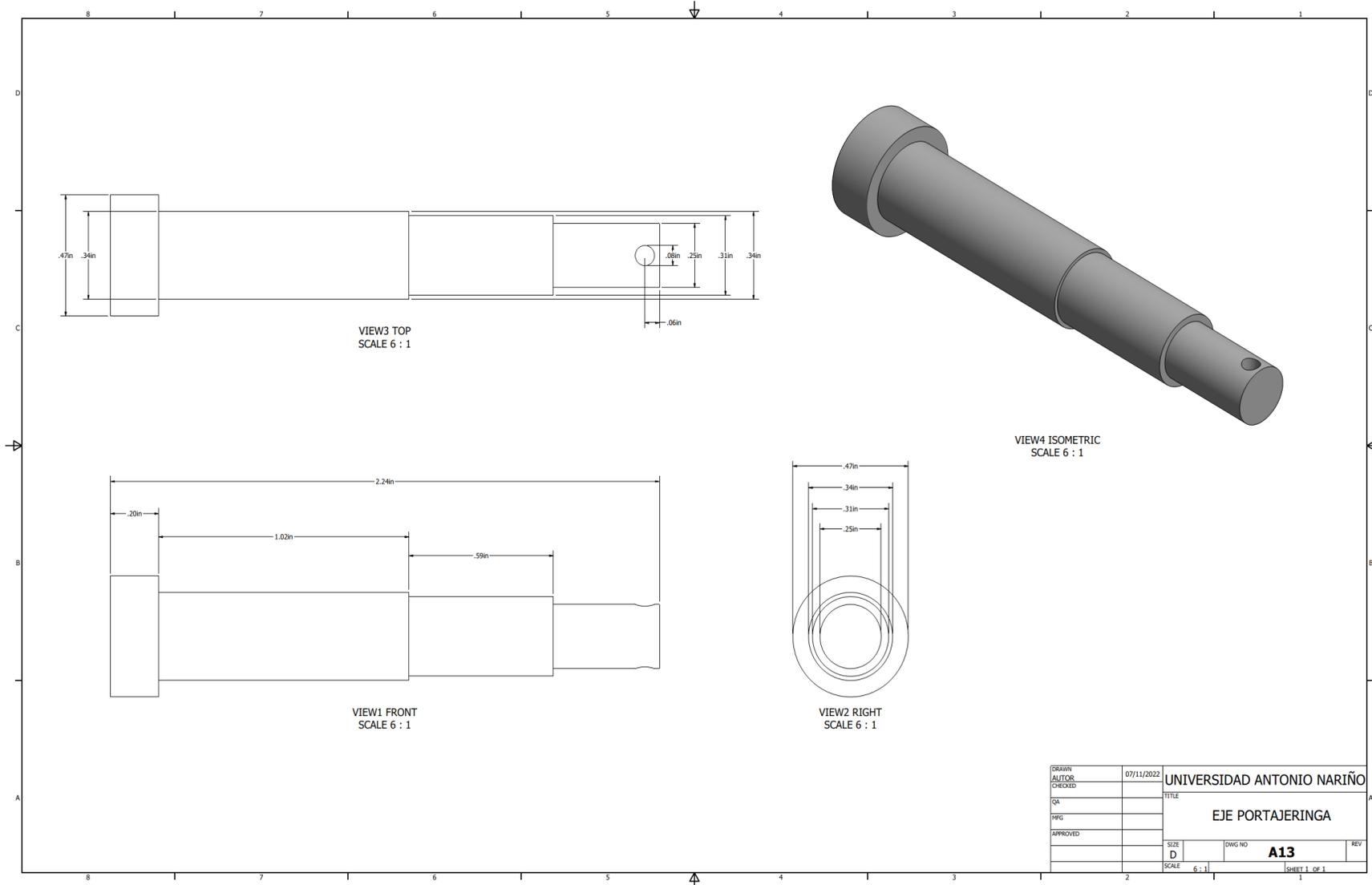


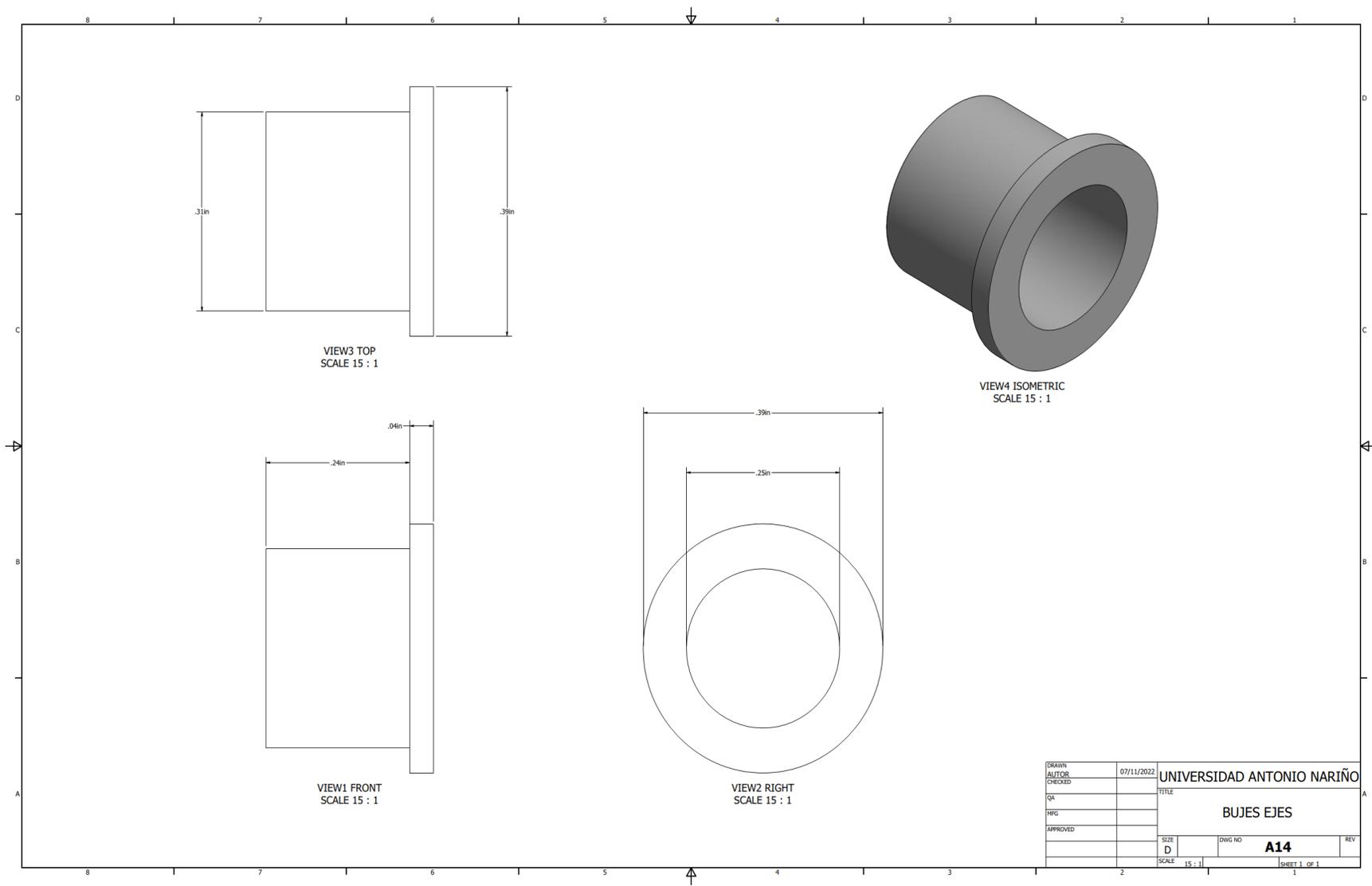


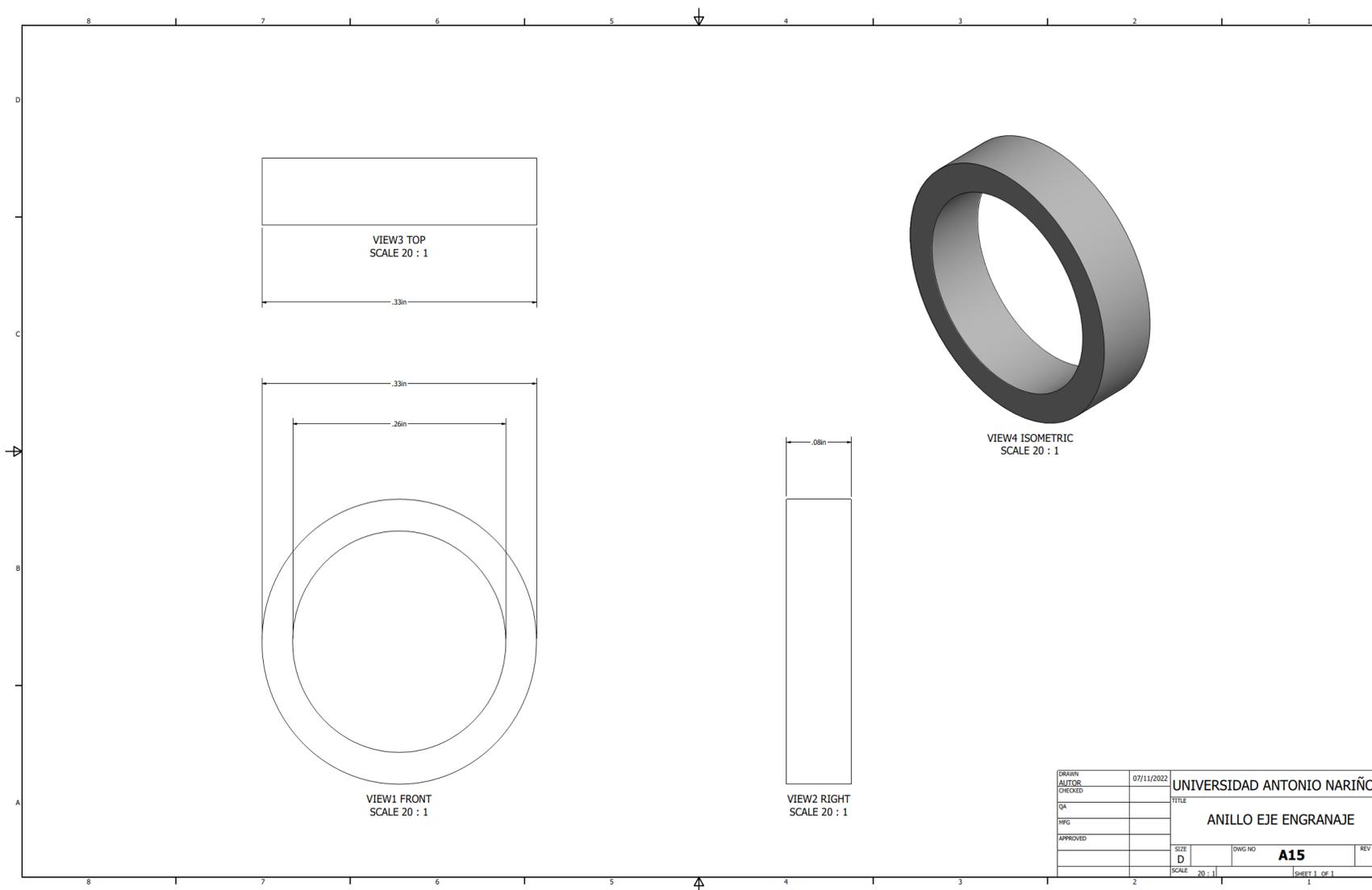
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		EJE ENGRANAJES	
QA		SIZE	REV
MFG		D	A11
APPROVED		SCALE	SHEET 1 OF 1
		6:1	1



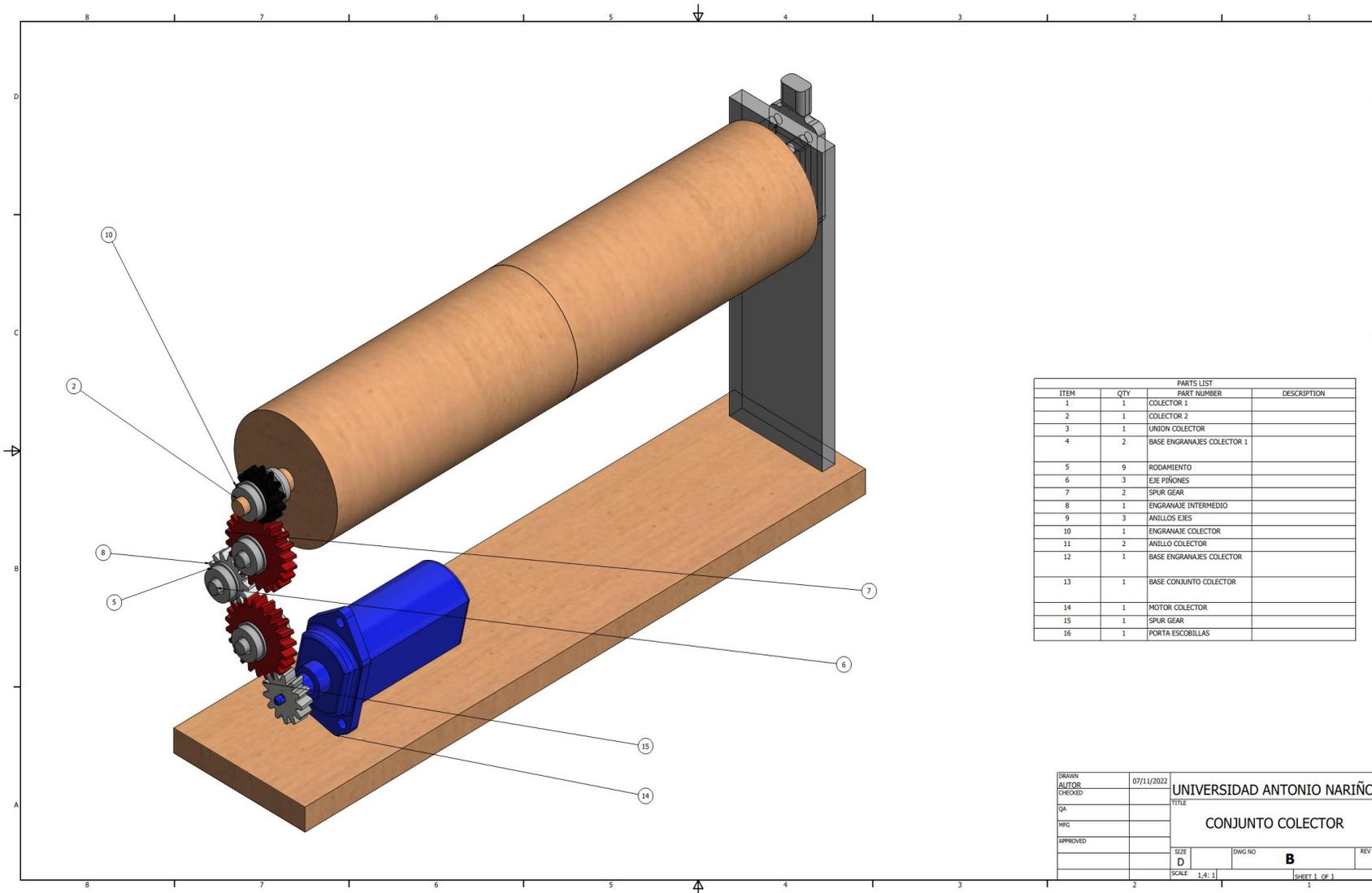
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		EJE PIÑON ACCIONAMIENTO	
QA		SIZE	DWG NO
MPG		D	A12
APPROVED		SCALE	7 : 1
		SHEET 1 OF 1	





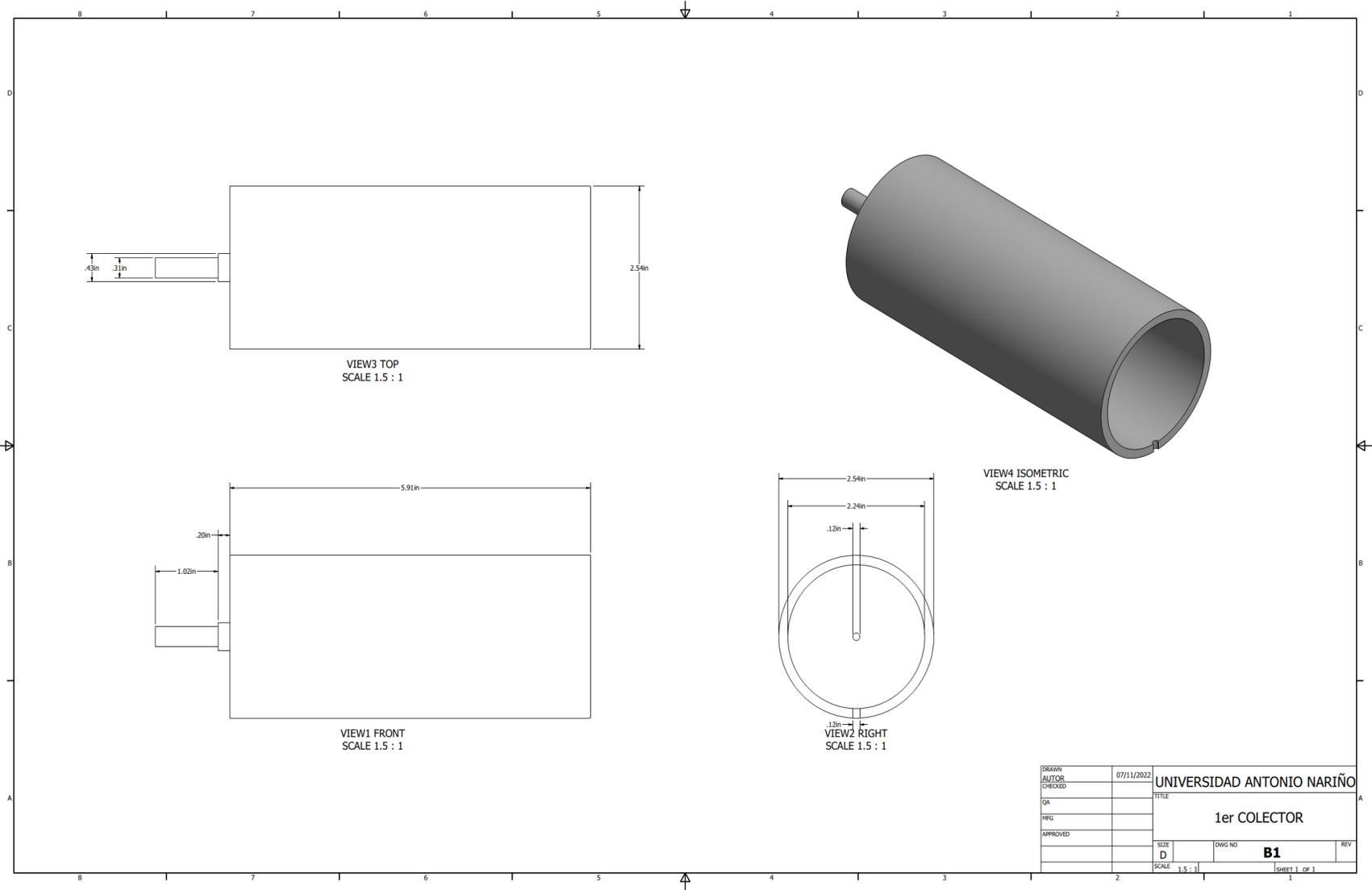


DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		ANILLO EJE ENGRANAJE	
QA		SIZE	DWG NO
MPG		D	A15
APPROVED		SCALE	REV
		20 : 1	1
		SHEET 1 OF 1	

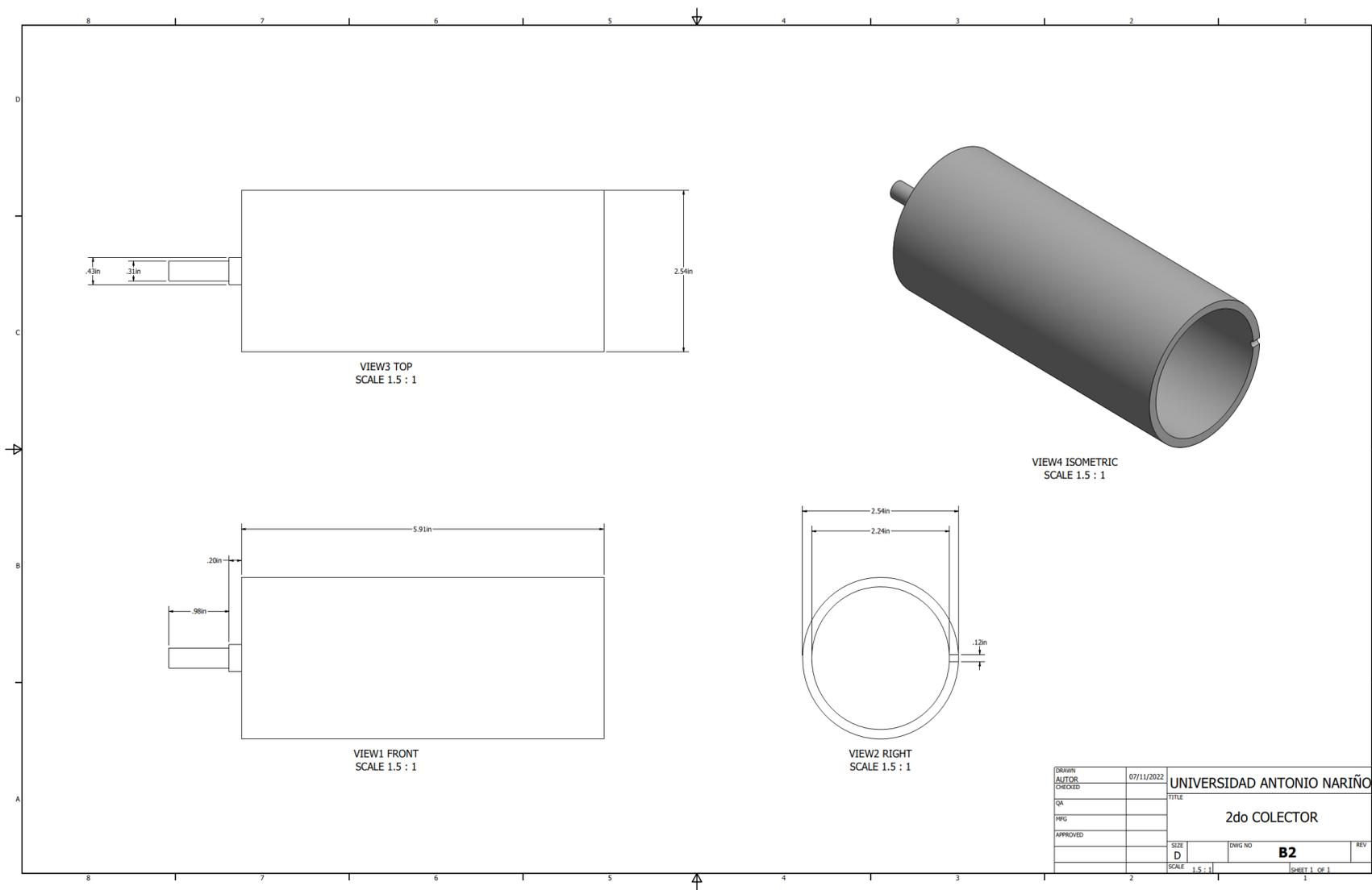


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	COLECTOR 1	
2	1	COLECTOR 2	
3	1	UNION COLECTOR	
4	2	BASE ENGRANAJES COLECTOR 1	
5	9	RODAMIENTO	
6	3	EJE PIÑONES	
7	2	SPUR GEAR	
8	1	ENGRANAJE INTERMEDIO	
9	3	ANILLOS EJES	
10	1	ENGRANAJE COLECTOR	
11	2	ANILLO COLECTOR	
12	1	BASE ENGRANAJES COLECTOR	
13	1	BASE CONJUNTO COLECTOR	
14	1	MOTOR COLECTOR	
15	1	SPUR GEAR	
16	1	PORTA ESCOBILLAS	

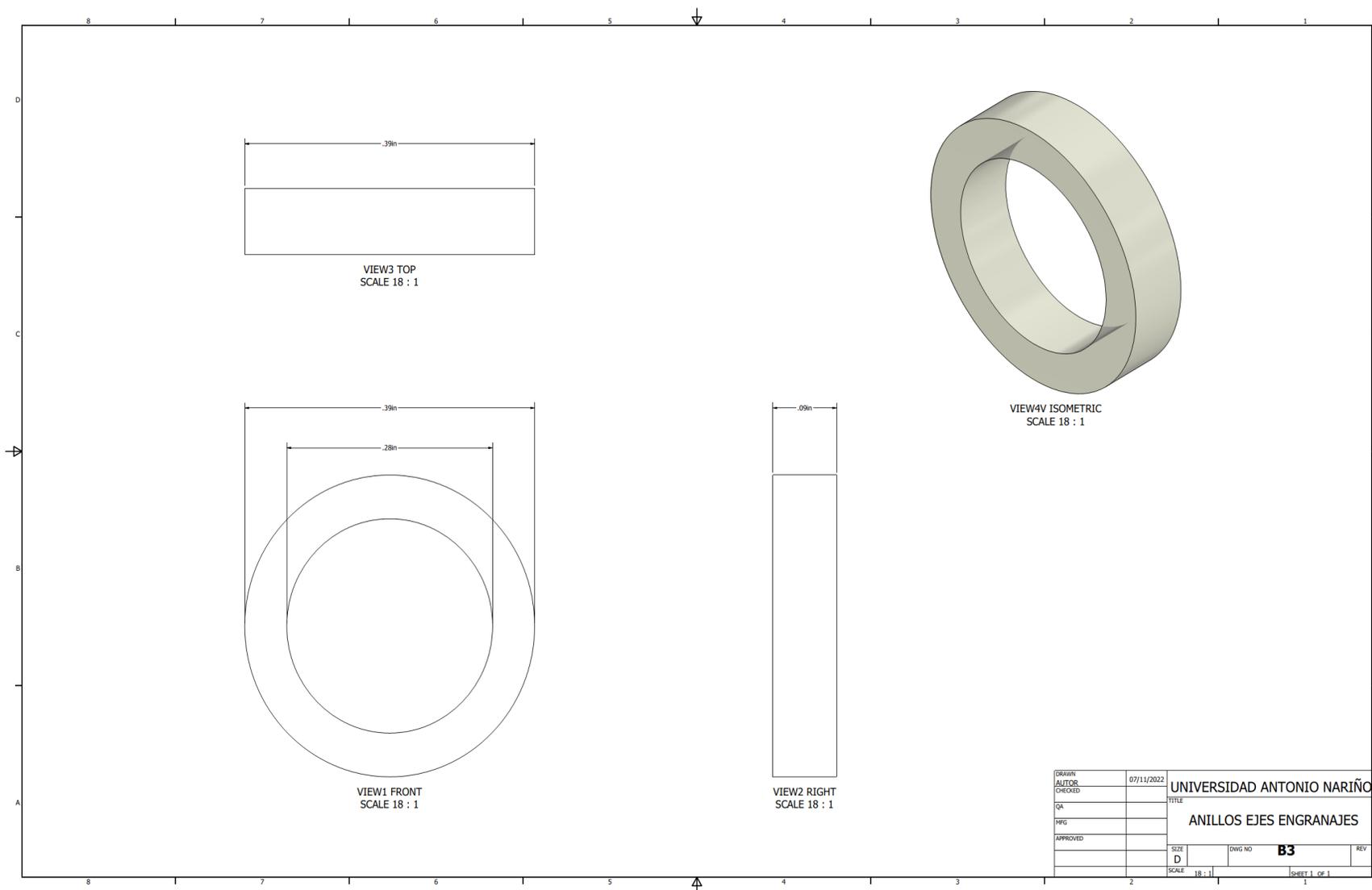
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		CONJUNTO COLECTOR	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	B
APPROVED		SCALE	REV
		1,4: 1	1



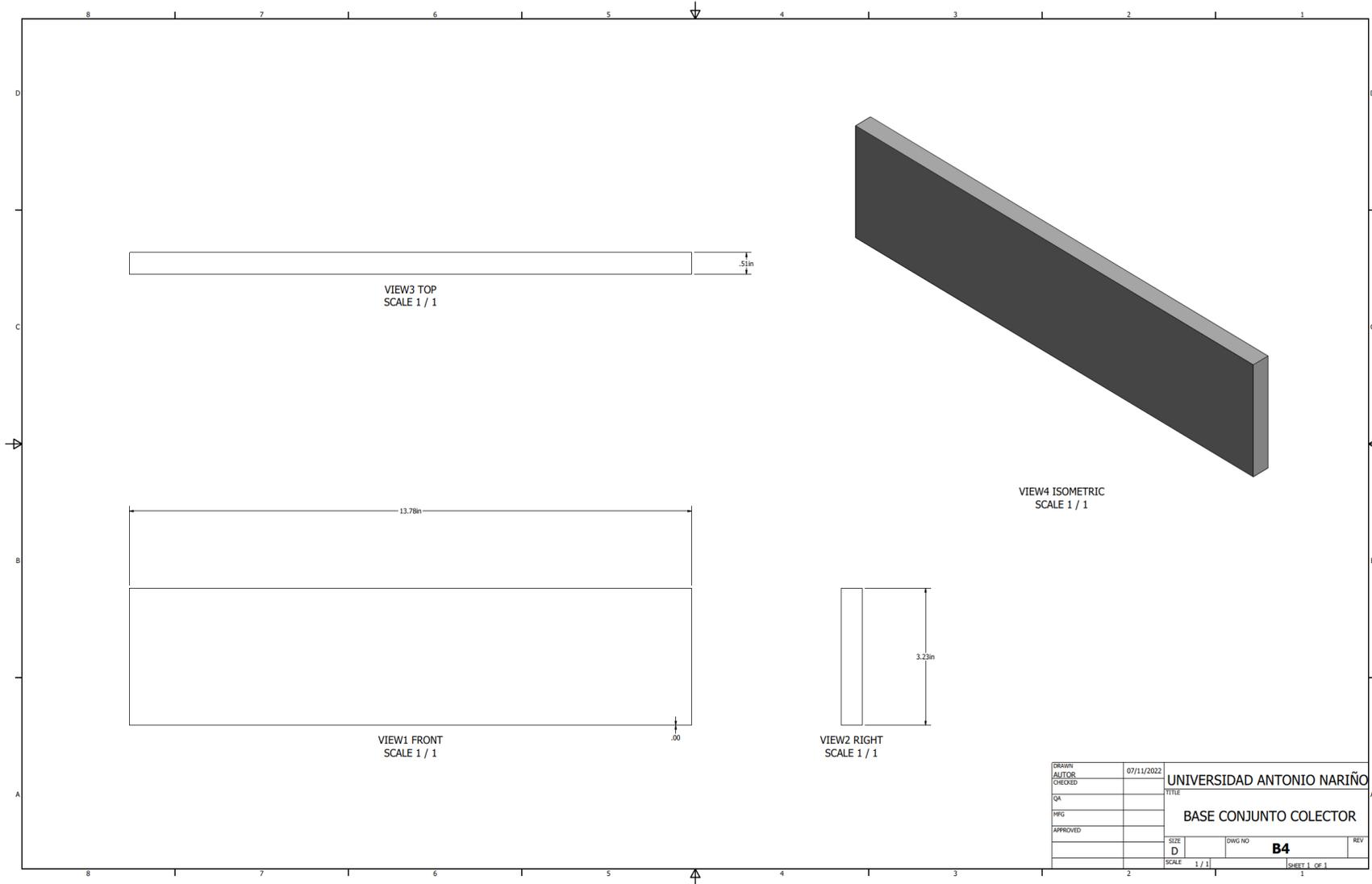
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		1er COLECTOR	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	B1
APPROVED		SCALE	1.5 : 1
		SHEET 1 OF 1	

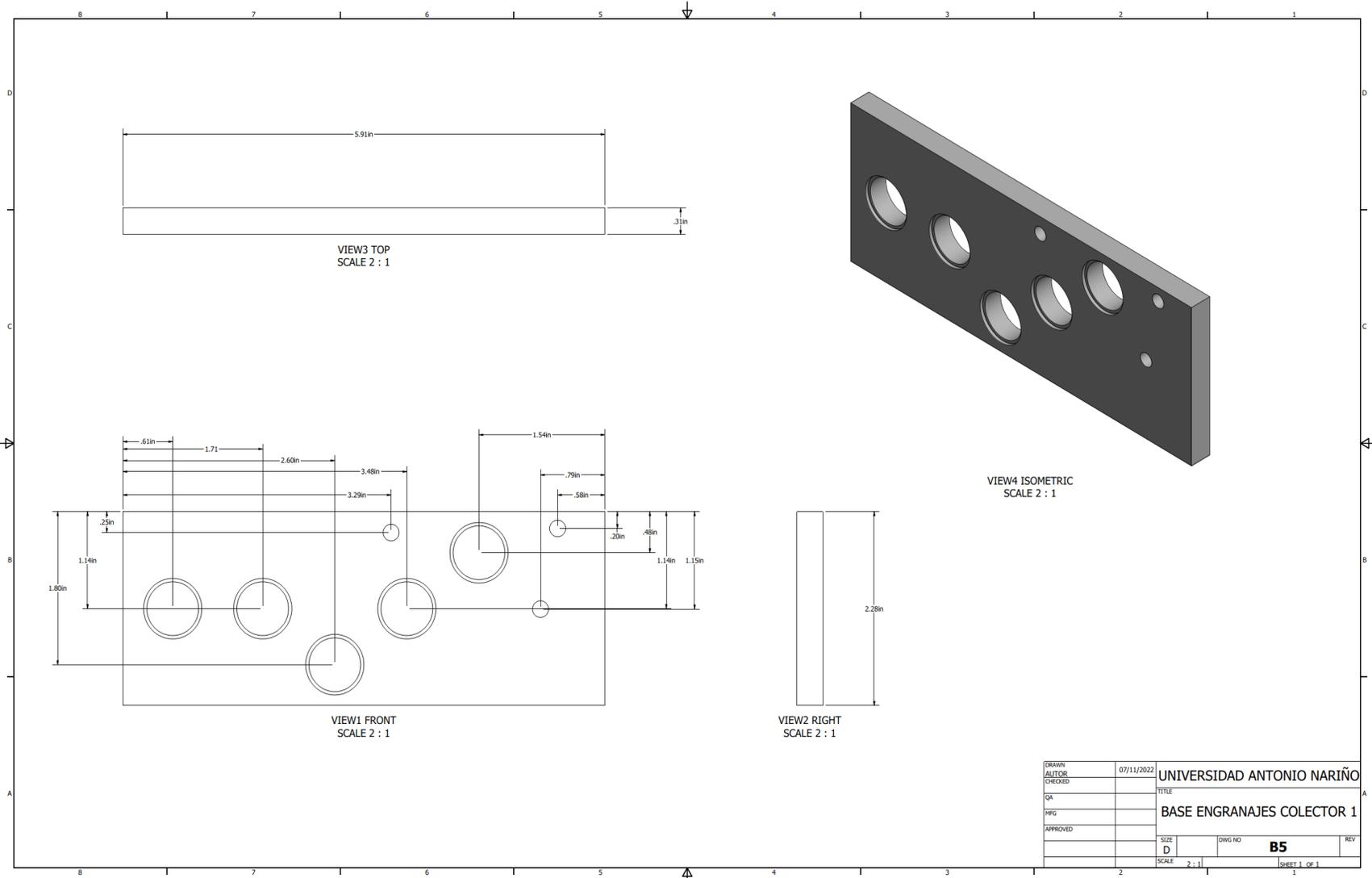


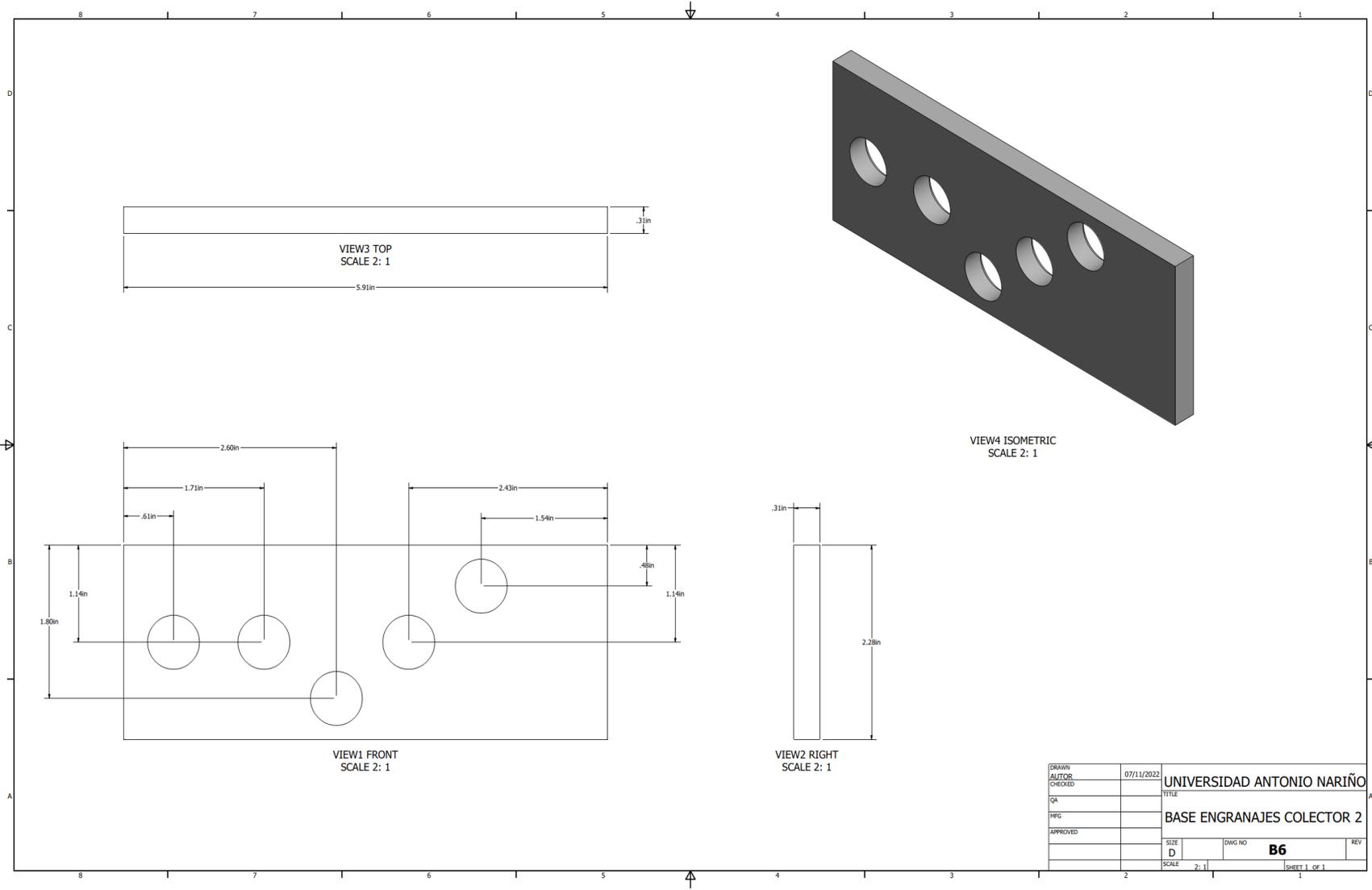
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		2do COLECTOR	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	B2
APPROVED		SCALE	REV
		1.5 : 1	1
			SHEET 1 OF 1



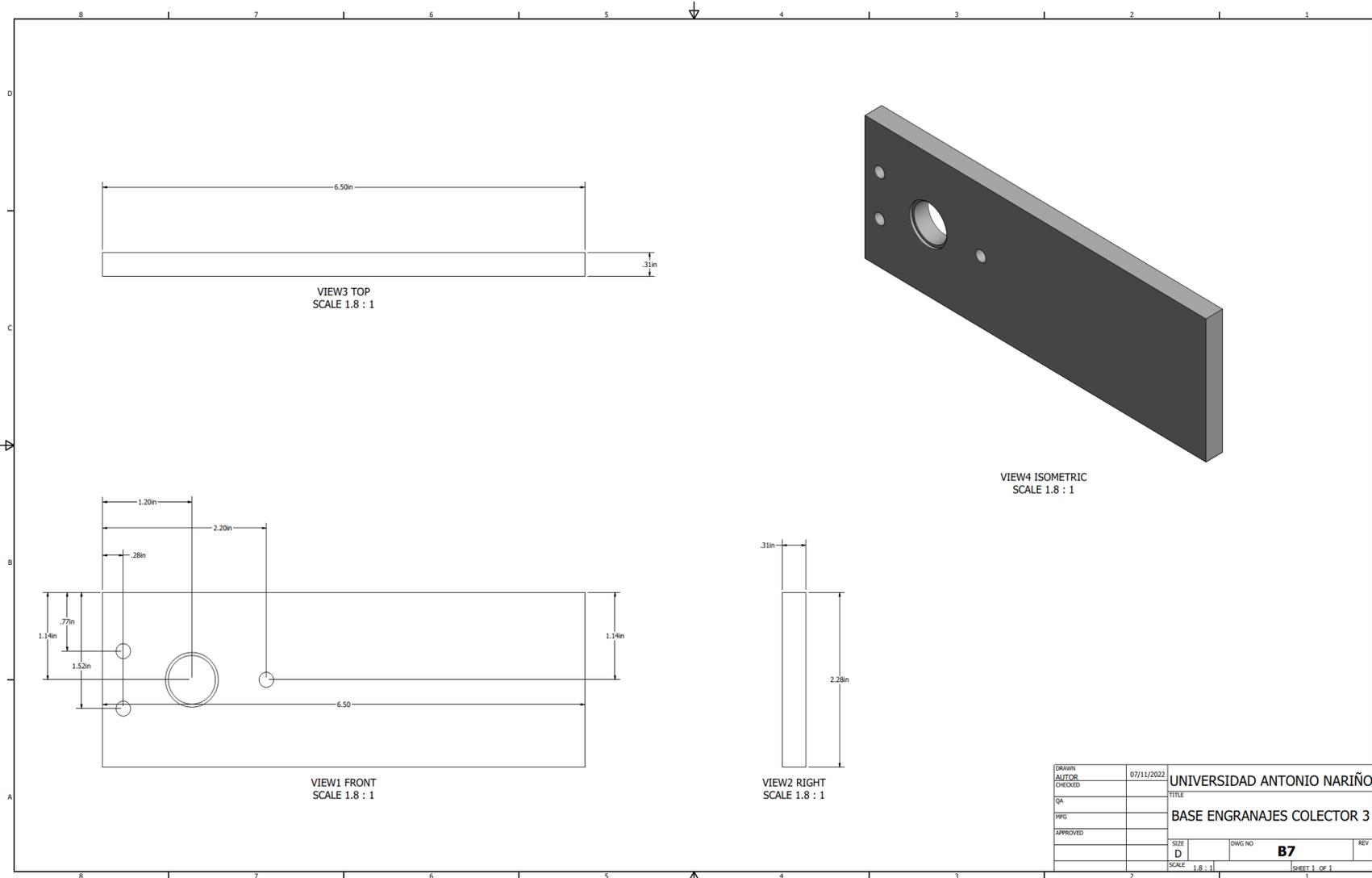
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		ANILLOS EJES ENGRANAJES	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	B3
APPROVED		SCALE	REV
		18 : 1	1
		SHEET 1 OF 1	



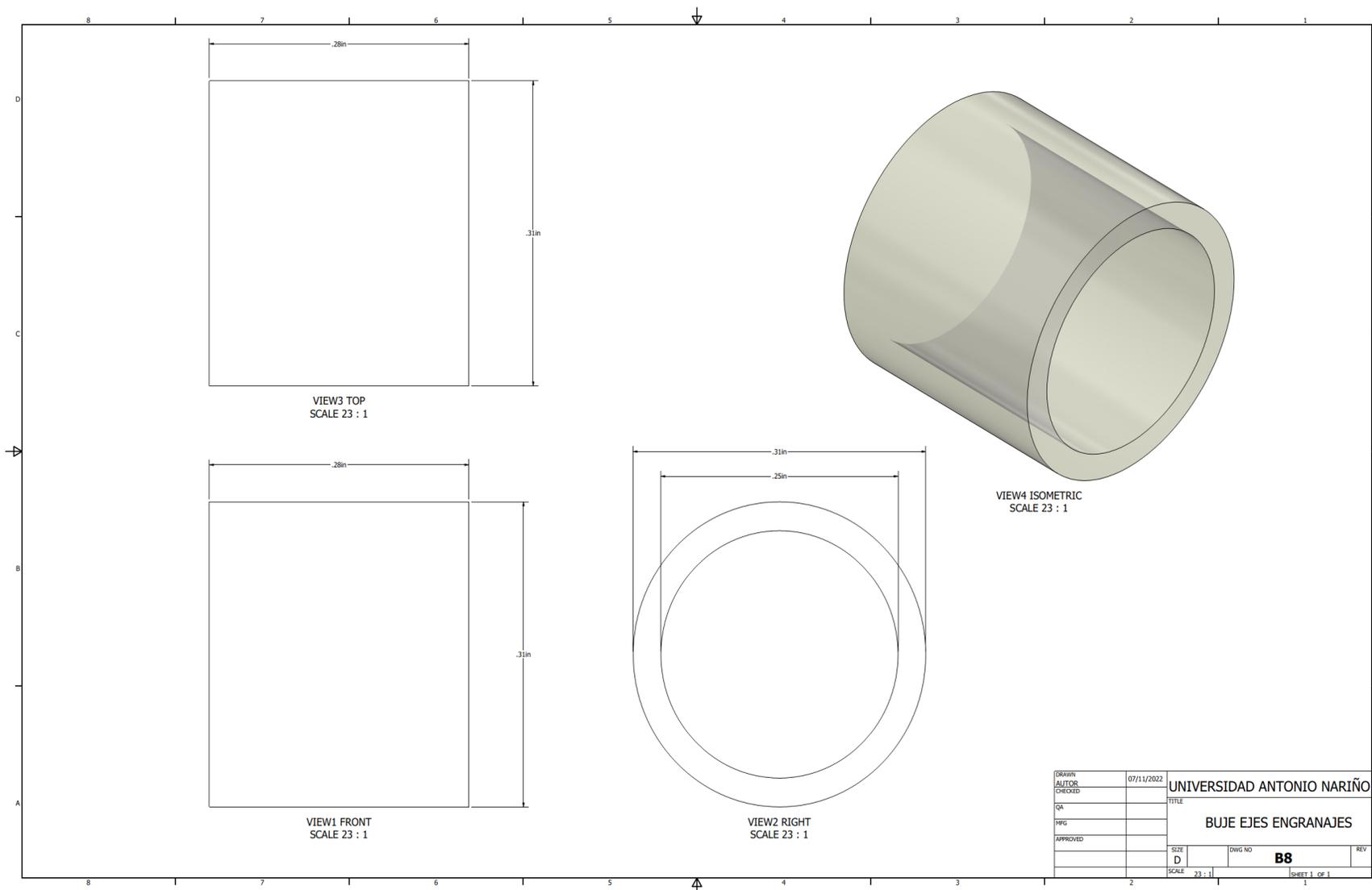




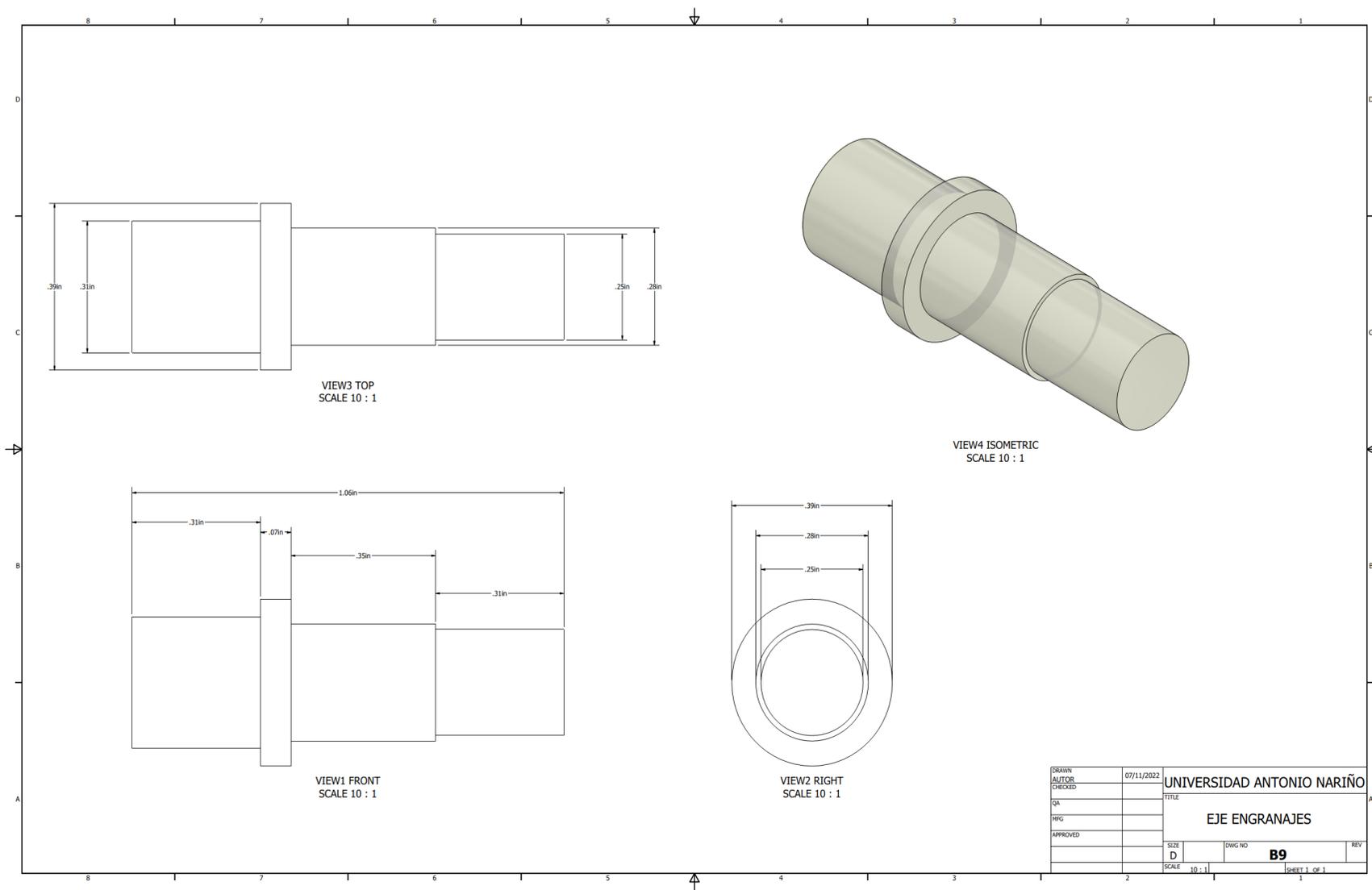
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		BASE ENGRANAJES COLECTOR 2	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	B6
APPROVED		SCALE	2: 1
		SHEET 1 OF 1	

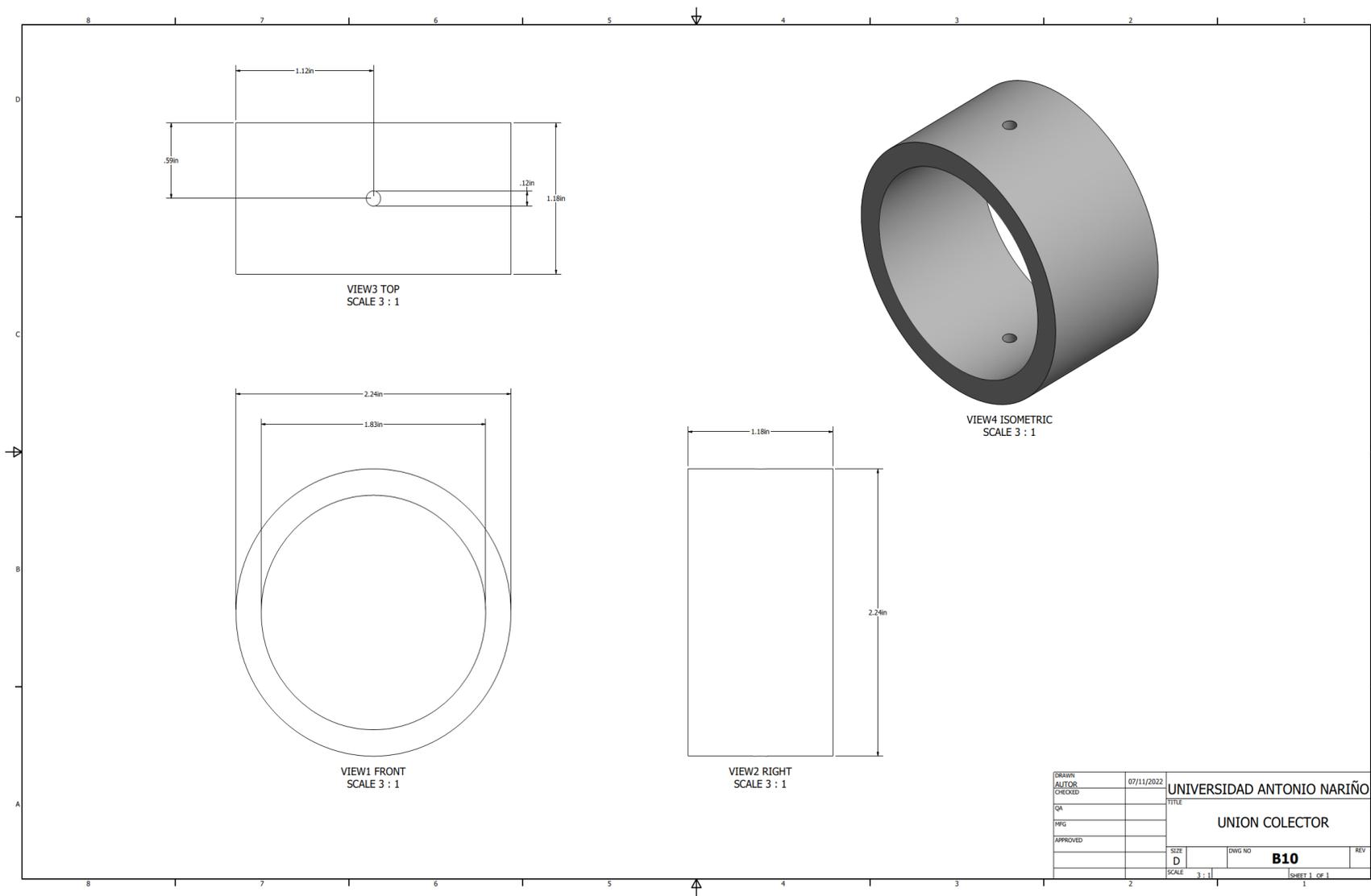


DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		BASE ENGRANAJES COLECTOR 3	
QA			
MFG			
APPROVED			
	SIZE	DWG NO	REV
	D	B7	
	SCALE 1.8 : 1	SHEET 1 OF 1	

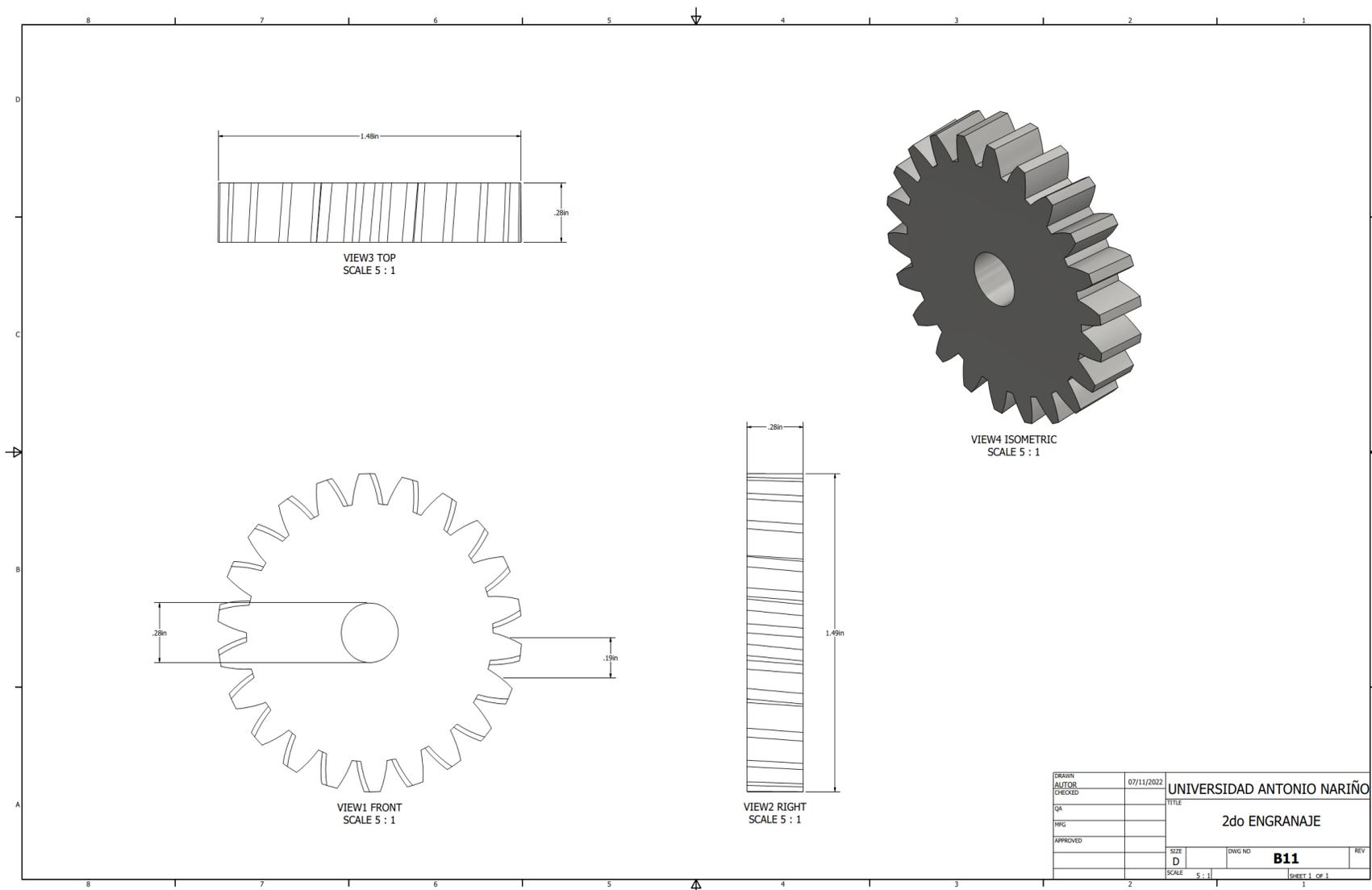


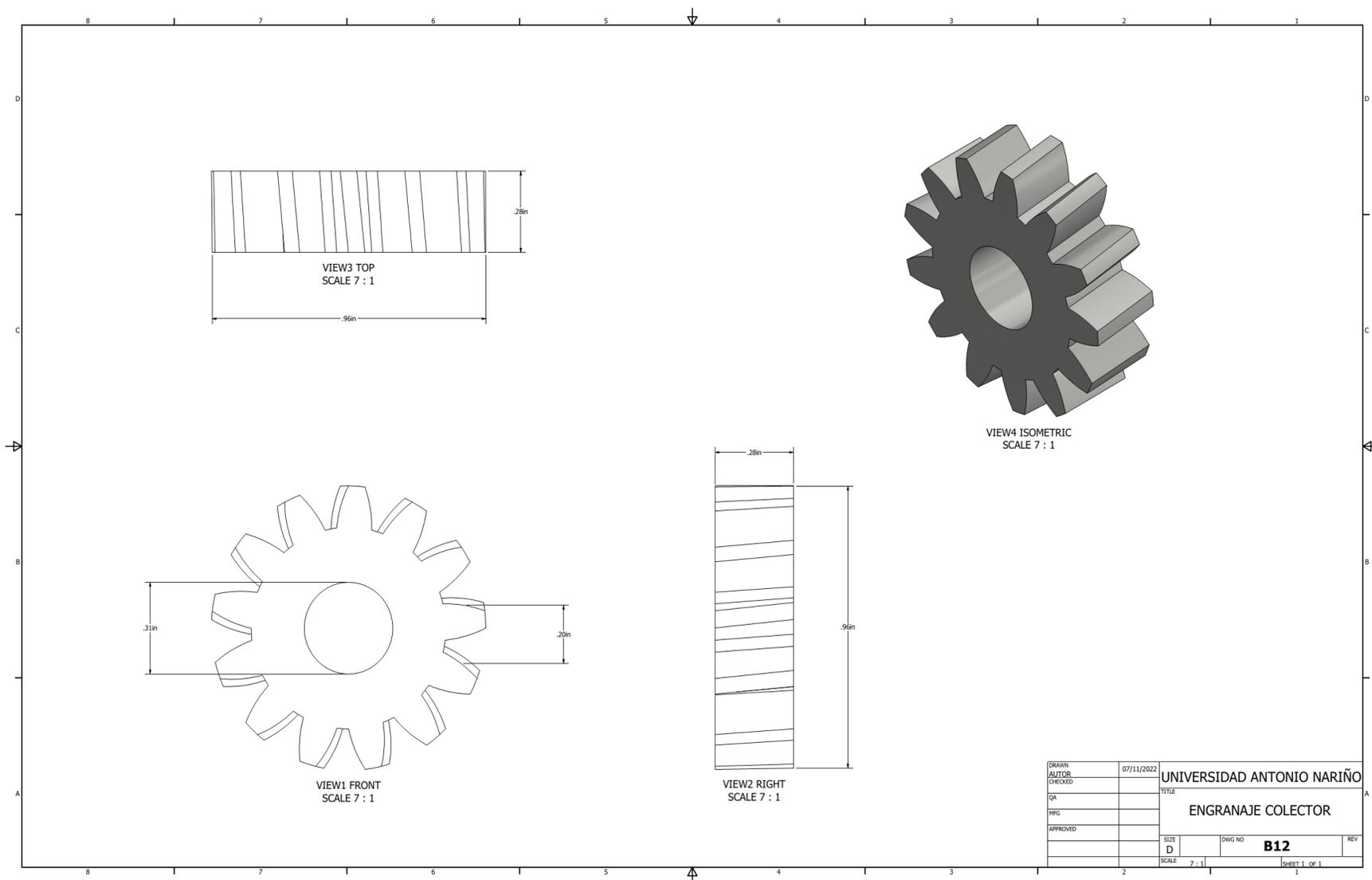
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		BUJE EJES ENGRANAJES	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	B8
APPROVED		SCALE	23 : 1
		SHEET 1 OF 1	



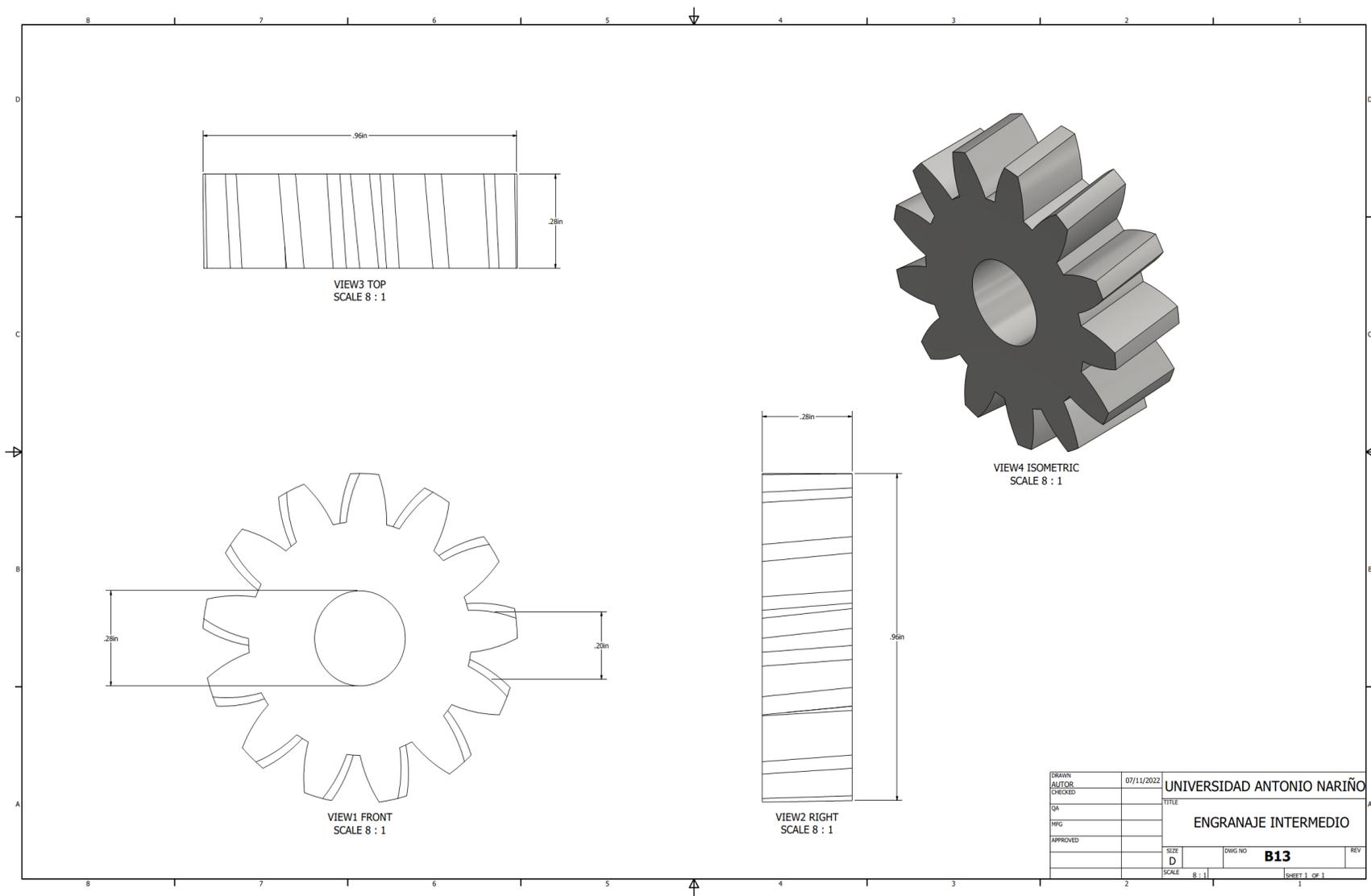


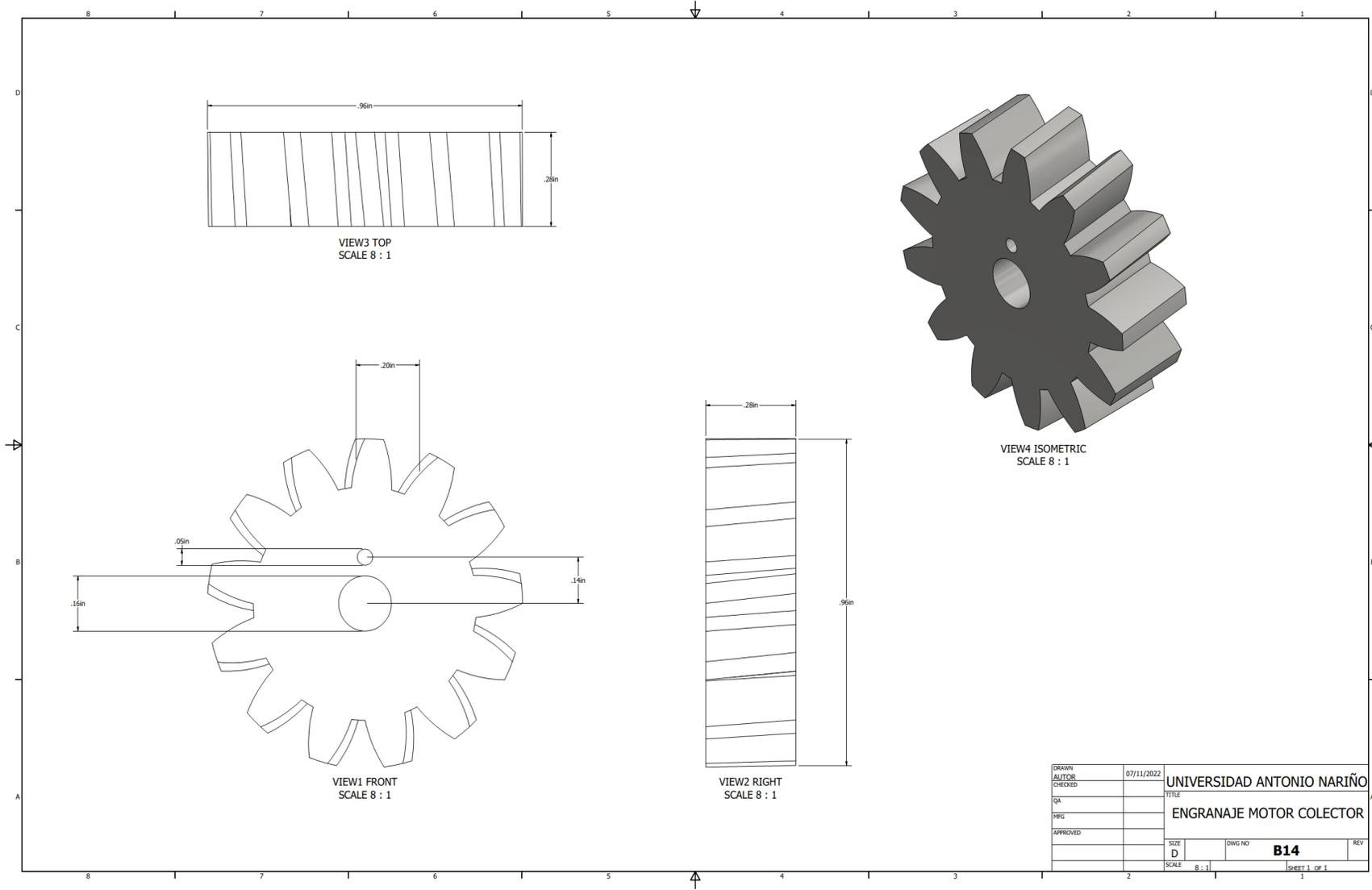
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		UNION COLECTOR	
QA			
PMG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		D	B10
		SCALE	SHEET 1 OF 1
		3 : 1	1



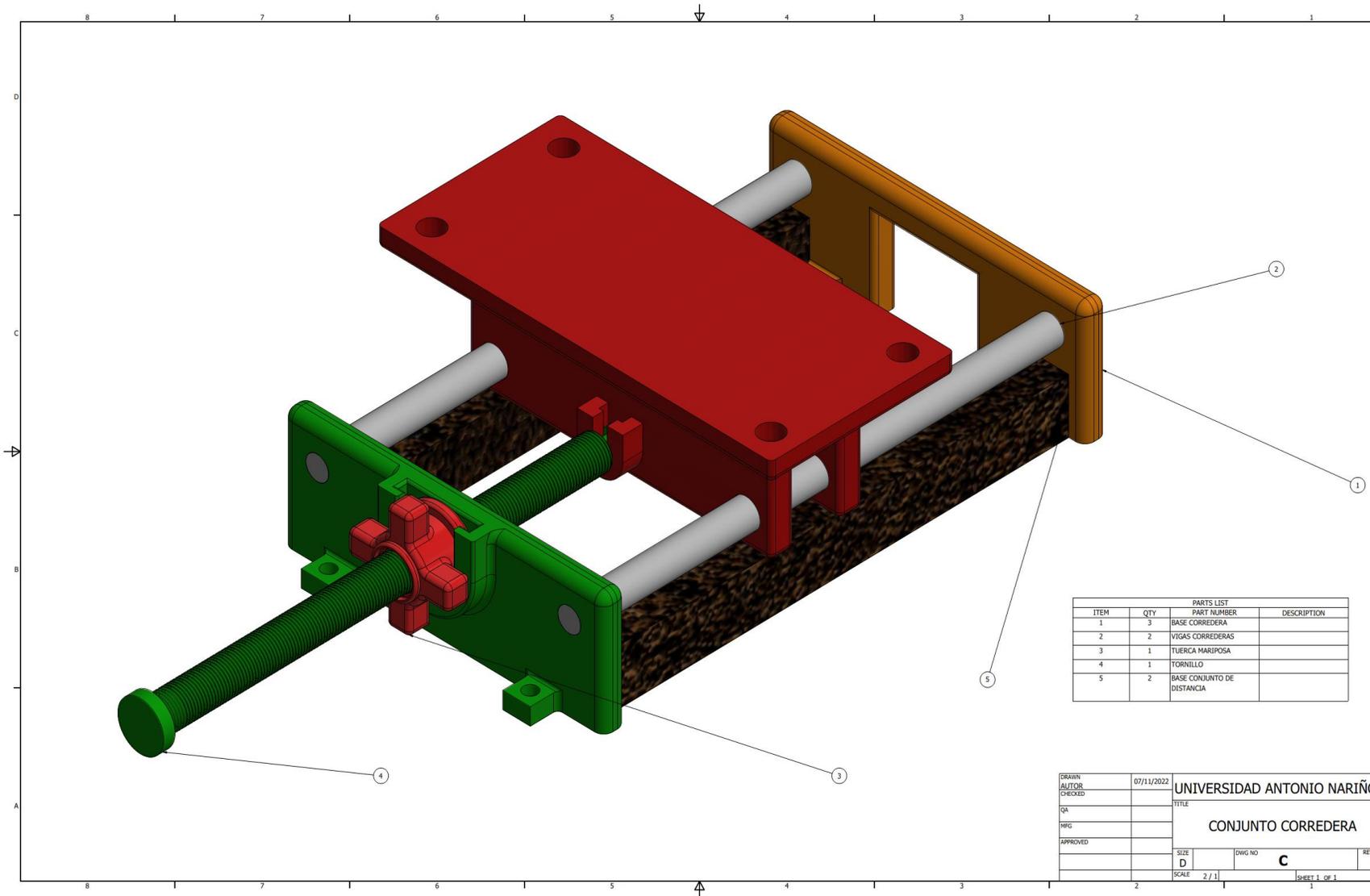


DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		ENGRANAJE COLECTOR	
QA		SIZE	D
MFG		DWG NO	B12
APPROVED		SCALE	7 : 1
		SHEET 1 OF 1	



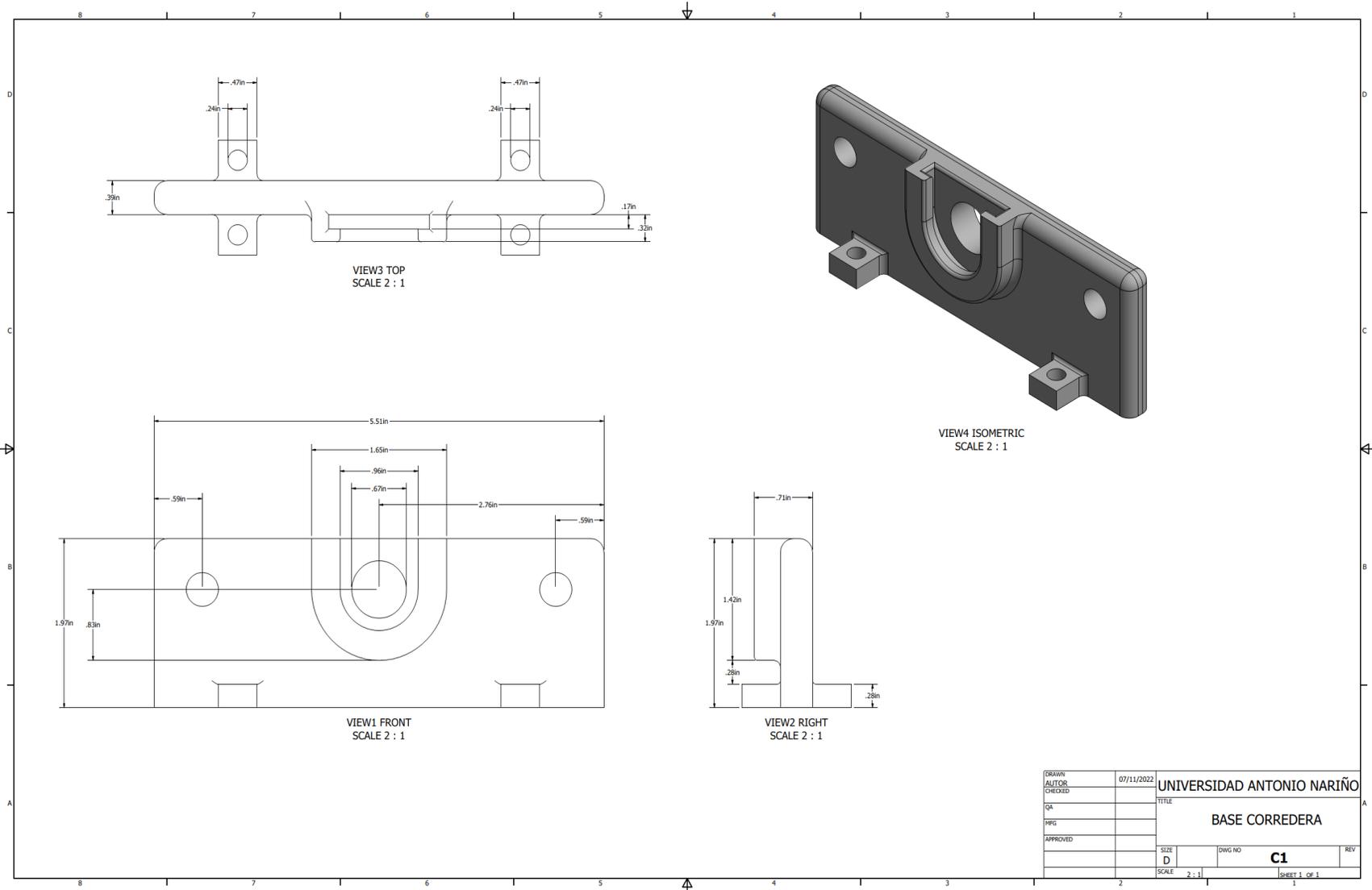


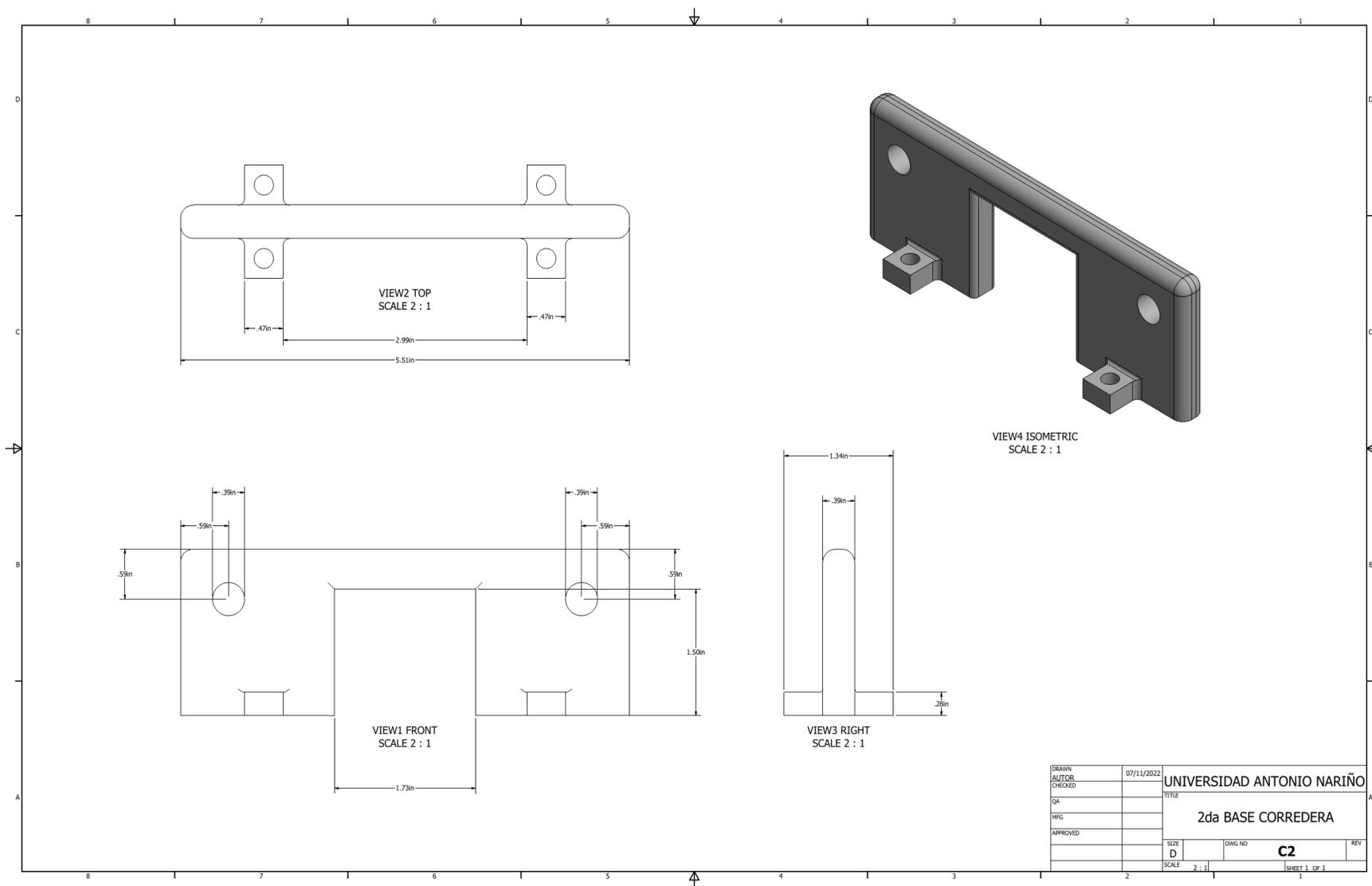
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TÍTULO	
CHECKED		ENGRANAJE MOTOR COLECTOR	
QA		SIZE	DWG NO
PRG		D	B14
APPROVED		SCALE	REV
		8 : 1	1 OF 1



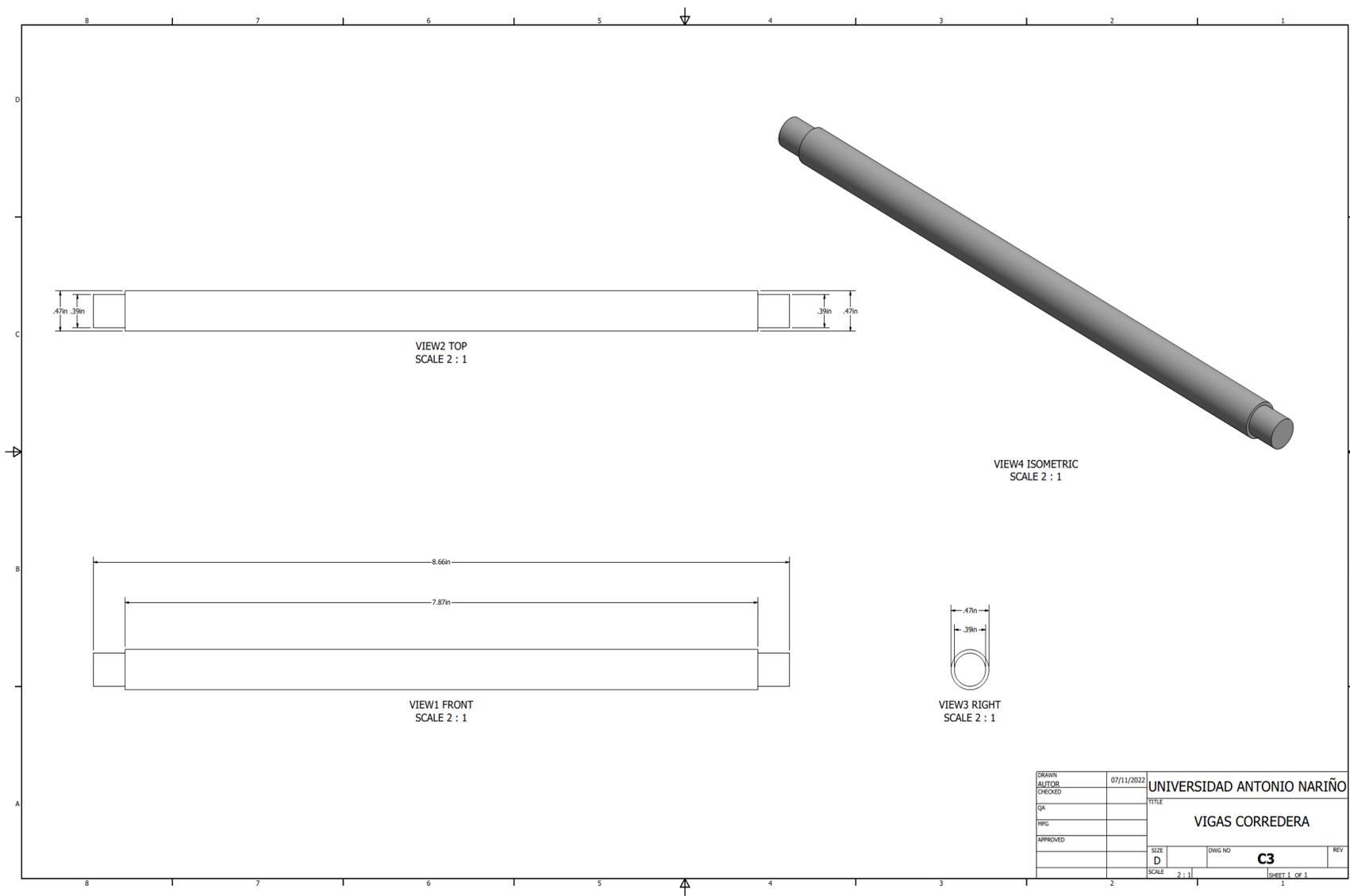
PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	3		BASE CORREDERA
2	2		VIGAS CORREDERAS
3	1		TUERCA MARIPOSA
4	1		TORNILLO
5	2		BASE CONJUNTO DE DISTANCIA

DESIGN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		CONJUNTO CORREDERA	
QA		SIZE	DWG NO
WFG		D	C
APPROVED		SCALE	REV
		2 / 1	1

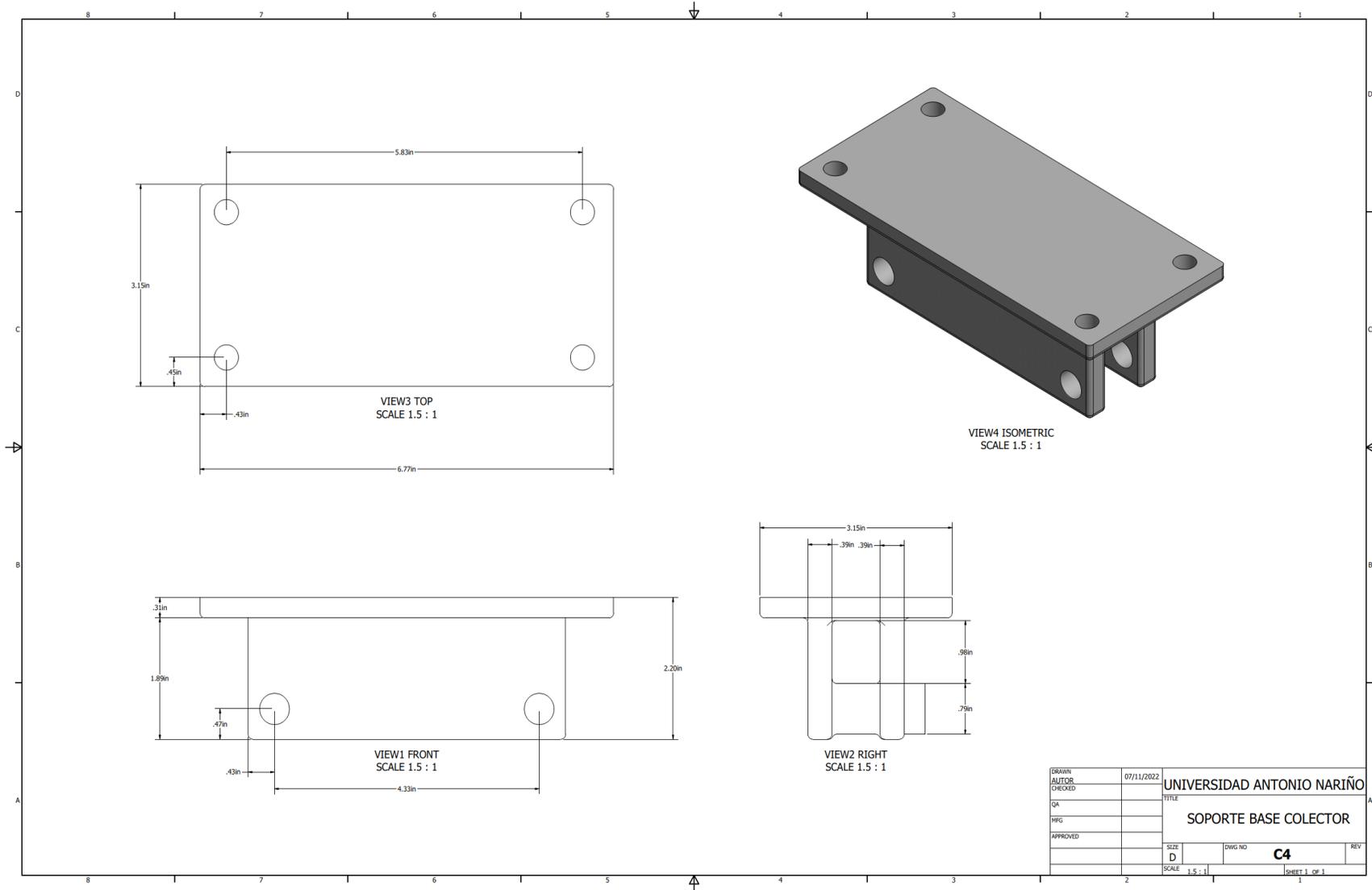




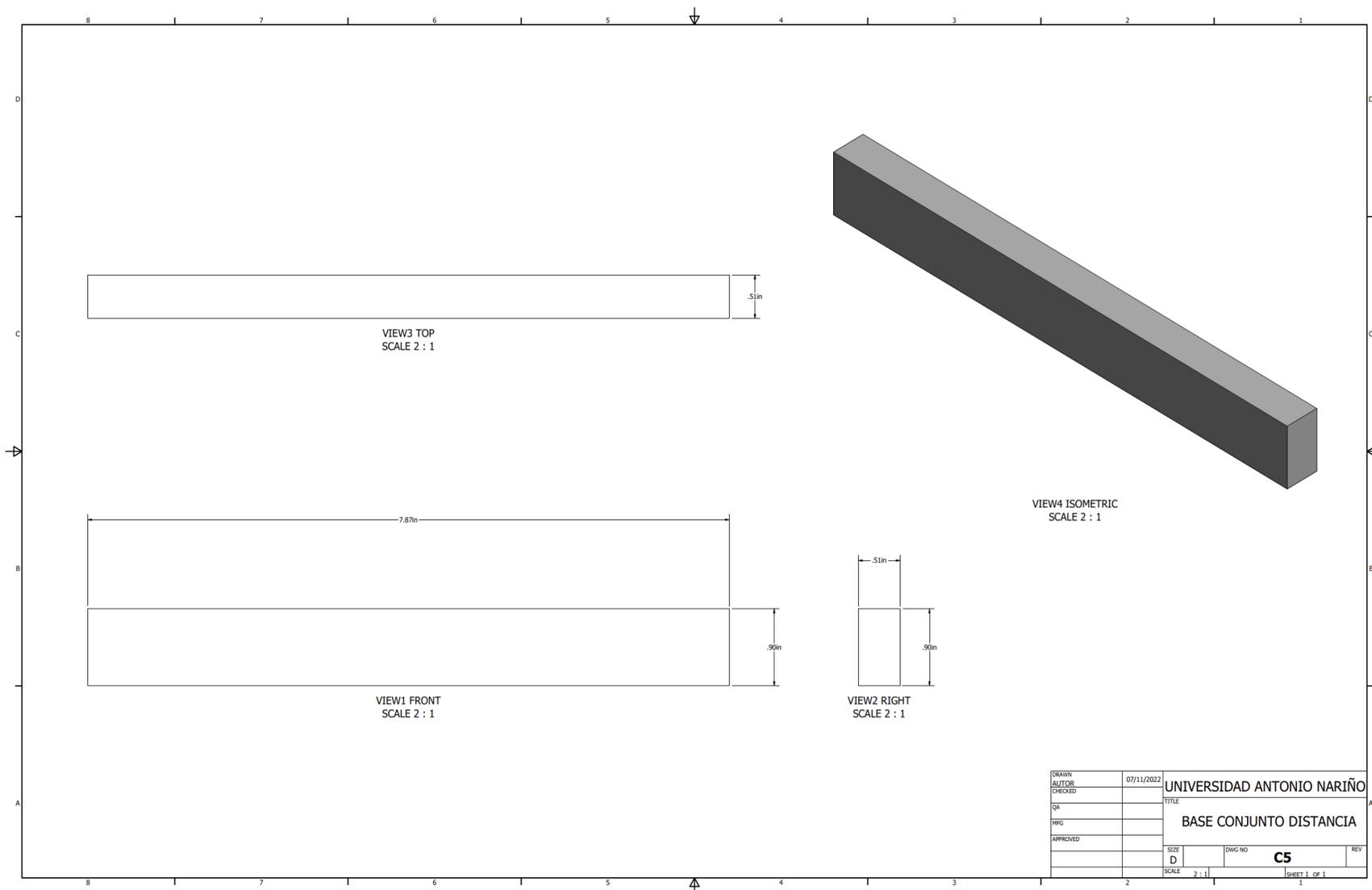
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTQR		TITLE	
CHECKED		2da BASE CORREDERA	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	C2
APPROVED		SCALE	REV
		2 : 1	1
			SHEET 1 OF 1



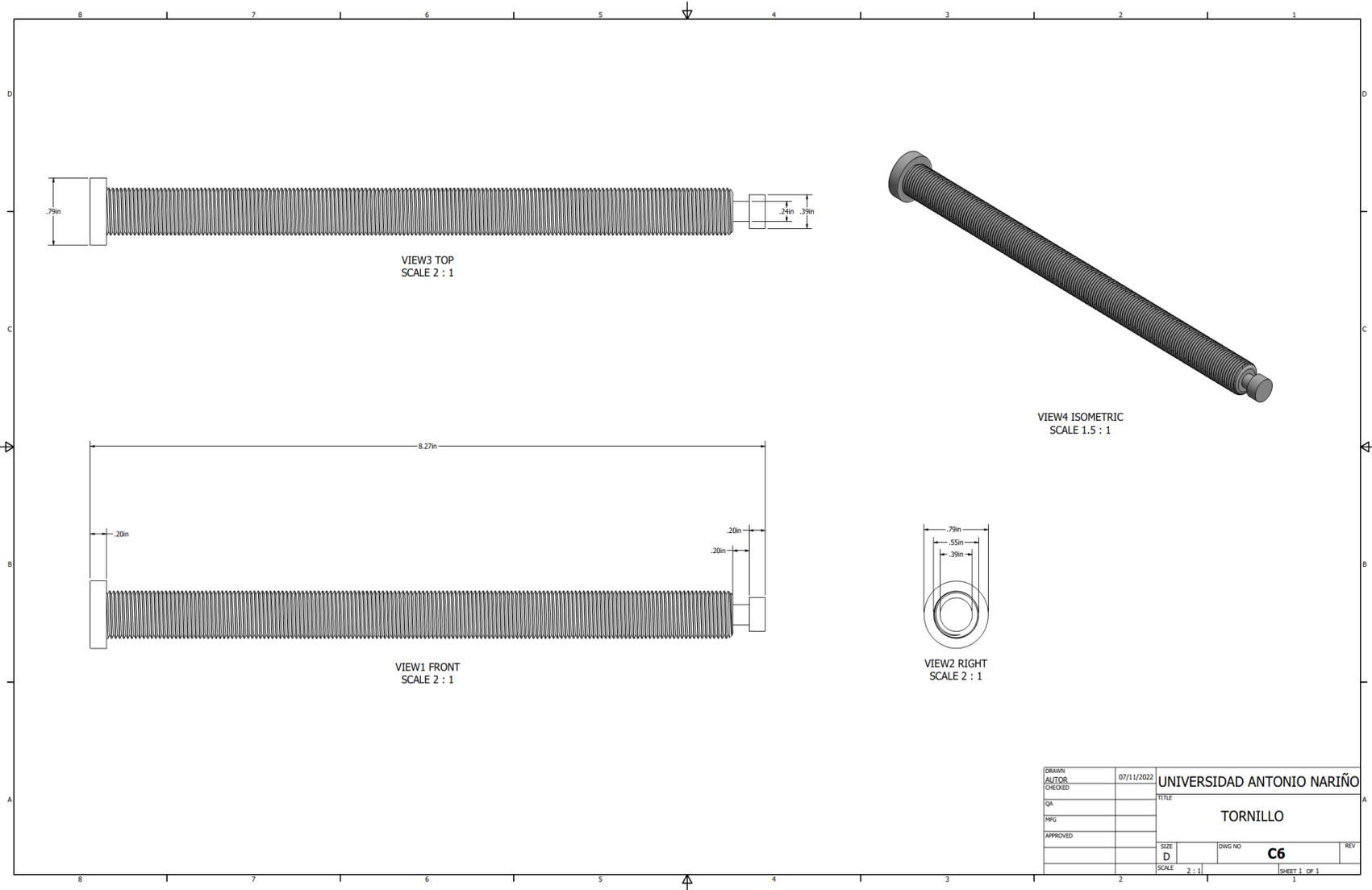
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		VIGAS CORREDERA	
QA			
MFG			
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	C3
SCALE	2 : 1	SHEET 1 OF 1	



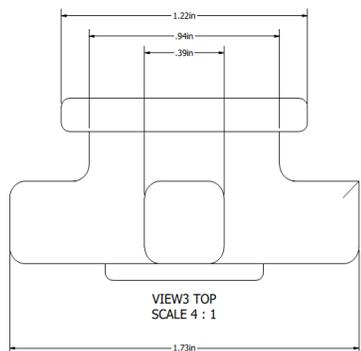
CRASH	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		SOPORTE BASE COLECTOR	
QA			
MFG			
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	C4
SCALE	1.5 : 1	SHEET 1 OF 1	



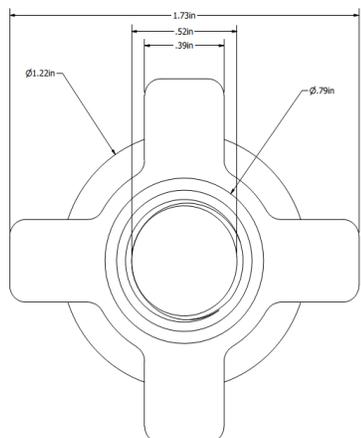
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		BASE CONJUNTO DISTANCIA	
QA		SIZE	DWG NO
MFG		D	C5
APPROVED		SCALE	2 : 1
		SHEET 1 OF 1	



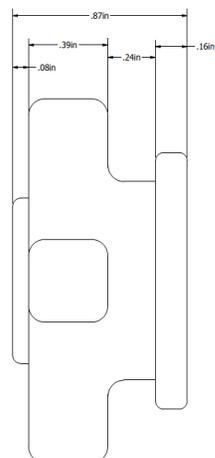
DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		TORNILLO	
QA		SCALE	
MRG		DWG NO	
APPROVED		C6	REV
		SCALE 2 : 1	SHEET 1 OF 1



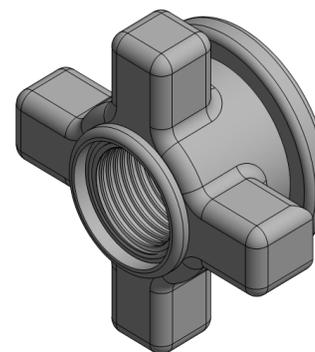
VIEW3 TOP
SCALE 4 : 1



VIEW1 FRONT
SCALE 4 : 1



VIEW2 RIGHT
SCALE 4 : 1



VIEW4 ISOMETRIC
SCALE 4 : 1

DRAWN	07/11/2022	UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	
AUTOR		TITLE	
CHECKED		TUERCA MARIPOSA	
QA		SIZE	DWG NO
RFQ		D	C7
APPROVED		SCALE	REV
		4 : 1	1
			SHEET 1 OF 1

REFERENCIAS

- 3D Printing Materials of the Highest Quality—Filaments. (s. f.). *Dynamical 3D*.
 Recuperado 28 de noviembre de 2022, de <https://www.dynamical3d.com/3d-printing-materials/>
- abax3d. (2020, diciembre 15). PLA y PETG: Características, diferencias y aplicaciones. *Abax Innovation Technologies*. <https://abax3dtech.com/2020/12/15/pla-y-petg-caracteristicas-diferencias-y-aplicaciones/>
- Bhardwaj, N., & Kundu, S. C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, 28(3), 325-347.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
- Bobina, Y. (s. f.). *Aleaciones de Aluminio ALAMBRES*. 10.
- C, L. S., S, A. R. de, & A, F. A. (2003). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 5(1), Art. 1.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>
- Cabrera, L., Felix, M., Pérez-Puyana, V., & Romero, A. (2019). Membrana de nanofibras procesadas mediante electrohilado con potencial uso en la encapsulación de enzimas. *Afinidad*, 76(587).
- Coca, A. R. (s. f.). *PROPIEDADES DEL ACRÍLICO*. 1.
- Creality Ender 3. (s. f.). *makeR*. Recuperado 27 de octubre de 2022, de <https://somosmaker.com/producto/creality-ender-3-kit-diy/>
- Ferretrónica—Suministro de Componentes Electrónicos*. (s. f.). Ferretrónica. Recuperado 17 de octubre de 2022, de <https://ferretronica.com/>

- Gómez-Tejedor, J. A., Van Overberghe, N., Rico, P., & Ribelles, J. L. G. (2011). Assessment of the parameters influencing the fiber characteristics of electrospun poly (ethyl methacrylate) membranes. *European Polymer Journal*, 47(2), 119-129.
- Herrero Carrión, A. (2015). *Diseño y puesta a punto de una cámara de electrohilado con control de temperatura y humedad ambiental*. Universitat Politècnica de València.
- Jeringas y agujas / Fisher Scientific. (s. f.). Recuperado 26 de octubre de 2022, de <https://www.fishersci.es/es/es/products/I9C8L6PQ/syringes-syringes-needles.html>
- Molfino, H. M. G., Alcalde-Yañez, A., Valverde-Morón, V., Villanueva-Salvatierra, D., Molfino, H. M. G., Alcalde-Yañez, A., Valverde-Morón, V., & Villanueva-Salvatierra, D. (2020). Electrospinning: Avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 20(4), 706-713. <https://doi.org/10.25176/rfmh.v20i4.3004>
- Mott, R. L. (2006a). *Diseño de elementos de máquinas*. Cuatro, 944.
- Mott, R. L. (2006b). *Mecánica de Fluidos 6/e*. Pearson educación.
- Mott, R. L., Pozo, V. G., Sánchez, S. S., Fernández, Á. H., & Sánchez, J. V. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*.
- Potenciómetro. (s. f.). ingeniatric. Recuperado 23 de febrero de 2023, de <http://ingeniatric.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/556-potenciómetro?tmpl=component&print=1>
- Proveedor y fabricantes de láminas de aluminio 3004 con precio bajo—Tigers Aluminium. (s. f.). Recuperado 21 de octubre de 2022, de <https://www.tigersalu.com/es/product/3004-aluminum-sheet/>

- R, J. L. (2021, abril 14). *ACRÍLICO / Características, propiedades y usos*. <https://comofunciona.co/acrilico/>
- Robles-García, M. A., Francisco, R.-F., Márquez-Ríos, E., Barrera-Rodríguez, A., Aguilar-Martínez, J., & Del toro-Sánchez, C. L. (2014). Aplicaciones biomédicas, textiles y alimentarias de nanoestructuras elaboradas por electrohilado. *Biotecnia*, 16(2), 44-52.
- Rodamiento F688ZZ. (s. f.). VISTRONICA S.A.S. Recuperado 20 de noviembre de 2022, de <https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/rodamientos/rodamiento-f688z-detail.html>
- Rodríguez Villacampa, L., Ranz Angulo, D., & Cuartero Salafranca, J. (2021). *Estudio del comportamiento intercapa de materiales para impresión 3D*.
- Ruiz Silva, E. S. (2020). *Diseño y construcción de una máquina de electrohilado vertical de 0 a 15 KV para generar nanofibras a base del polímero polisiloxano*. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/30661>
- Sánchez, L. D., Rodriguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: La era de las nanofibras. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 14(1), 10-27.
- Sierra Cardenas, N. A. (2018). *ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL ACIDO POLI- LÁCTICO CON GRAFENO OBTENIDO POR ELECTROHILADO*. Antonio Nariño.
- Torres Martínez, J. V. (2021). *Diseño de equipo electrohilado por método centrifugado para polímeros*.
- Trapero, D. (2017, julio 24). Todo sobre el PETG en impresión 3D. *Bitfab*. <https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/>

Velázquez de la Luz, E. (2021). *Procesamiento por electrohilado y caracterización de membranas PLA y PVA con microestructura.*

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/16019>