

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TEZIUTLÁN

Tesis

“PROPUESTA DE DISEÑO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO DE
BRAZO MANIPULADOR PARA LA RECOLECCIÓN DE
GRANOS DE CAFÉ”

PRESENTA:

HADASSA MENDIOLA VALLON

CON NÚMERO DE CONTROL
19TE0491

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECATRÓNICO

CLAVE DEL PROGRAMA ACADÉMICO
IMCT-2010-229

DIRECTOR (A) DE TESIS:
MSC. ALFREDO CARRASCO ARAÓZ

“La Juventud de hoy, Tecnología Del Mañana”

TEZIUTLÁN, PUEBLA, ENERO DE 2024

PREELIMINARES

Agradecimientos

A DIOS

Dios, tu amor y tu bondad no tienen fin, no me dejas sola en ningún momento de mi vida y todos mis logros son resultado de tu ayuda. Gracias por estar presente no solo en esta etapa tan importante de mi vida profesional, sino en todo momento, gracias porque hasta ahora me has ayudado.

"Oh Señor, Dios mío, te daré gracias para siempre." - Salmos 30:12

A MI FAMILIA

En este momento de culminación y logro, les agradezco con todo mi corazón su tan grande apoyo, amor incondicional a lo largo de mi vida y durante todo mi proceso de educación. Sus oraciones y sus fortalezas han sido un pilar en mi camino hacia la realización de esta tesis.

A través de sus sacrificios y su ejemplo, me han enseñado la importancia de esforzarse y seguir adelante a pesar de todas las dificultades, este logro también es suyo. Su confianza en mí me ha permitido crecer y alcanzar mis metas.

Gracias por ser mi familia, y mis mayores admiradores.

A EDGAR AISAI RODRÍGUEZ VÁZQUEZ

Estoy tan profundamente agradecida por tenerte en mi vida. Tu presencia ha sido un regalo invaluable que ilumina mis días y llena mi corazón de alegría.

Agradezco tu amor incondicional, tu ánimo y tu apoyo constante en los días buenos y los no tan buenos. En este viaje juntos, quiero que sepas que amo cada momento que compartimos y cada experiencia vivida.

Eres mi compañero, mi amigo y mi persona. Gracias por siempre estar conmigo.

A MI DIRECTOR DE TESIS EL MSC. ALFREDO CARRASCO ARAÓZ

Quiero agradecerle por haber sido mi guía y mentor a lo largo de esta tesis. Tu apoyo incondicional y sabiduría han sido fundamentales en la realización de esta tesis, y no podría haber llegado hasta aquí sin tu orientación gracias por su dedicación y paciencia al brindarme sus conocimientos y experiencia en el campo.

AL M.I.M LUIS MANUEL GARCÍA MARTÍNEZ

Le agradezco grandemente por su ayuda y orientación dentro de esta tesis, gracias porque, aunque no fue mi director de tesis estuvo presente ayudándome con el desarrollo de cada uno de los cálculos y resultados.

Resumen

Puebla destaca por su abundante tradición en la producción de café. No obstante, hasta el momento, la recolección manual de los granos ha resultado ser una labor poco eficiente que demanda una considerable cantidad de mano de obra. La escasez de mano de obra, los altos costos operativos y la necesidad de mantener la calidad del grano son desafíos que enfrentan los productores locales. En muchas plantaciones de café, los cafetos se cultivan en pendientes, lo que hace que la recolección de las cerezas sea peligrosa, provocando a veces graves lesiones a los recolectores, pero, por otro lado, el precio del café disminuye y el pago de los salarios. La cosecha puede volverse no rentable, lo que significa que los jornaleros reciben salarios bajos o que las plantaciones de café ya no se consideran productivas y se abandonan.

La tesis "Propuesta para el diseño y análisis cinemático de un brazo robótico para la recolección de granos de café" presenta un enfoque innovador para resolver problemas en la industria del café. El objetivo principal de la investigación desarrollada por el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán es desarrollar un brazo robótico que pueda simular los movimientos coordinados necesarios para recolectar los granos de café.

La propuesta se basa en la integración de principios de robótica y análisis cinemático para crear una solución técnica que aumente la eficiencia y calidad del proceso de recolección. Al analizar el movimiento y los parámetros cinemáticos, nuestro objetivo es optimizar el funcionamiento del brazo robótico, aumentar la eficiencia de la cosecha y reducir el riesgo de daños al grano. La importancia de esta investigación radica en su enfoque práctico y aplicación directa a la industria cafetalera. Combinar robótica y agricultura es un gran paso adelante en la modernización de prácticas tradicionales, que no sólo promueve el progreso, sino también el inicio de varias innovaciones basadas en él.

Introducción

El continuo desarrollo de la tecnología y la creciente necesidad de mejorar los procesos industriales fomentan la búsqueda de soluciones innovadoras en diversos campos. En este contexto, la tesis "Propuesta para el diseño y análisis cinemático de un dispositivo robótico para la recolección de granos de café" representa un avance significativo en la intersección de la robótica y la industria agrícola. Este trabajo de investigación se realiza dentro del "Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán" con enfoque en la formación académica, la innovación y la búsqueda de soluciones prácticas.

En un mundo donde la tecnología evoluciona constantemente, la industria agrícola enfrenta el desafío de hacer sus procesos más eficientes y sustentables. Este trabajo es un esfuerzo interdisciplinario que combina la robótica con la agricultura para resolver un problema importante en la industria del café.

La cosecha de granos de café es una tarea difícil y crítica que requiere concentración y precisión. Pero la dependencia de la mano de obra y el aumento de los costos laborales plantean desafíos a la eficiencia y sostenibilidad de este proceso. La propuesta para el diseño de brazos robóticos y el análisis cinemático tiene como objetivo utilizar tecnología robótica para optimizar el rendimiento, reducir la dependencia laboral y mejorar la calidad del producto final.

El Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán es conocido por su compromiso con la formación de profesionales capacitados y la promoción de la innovación tecnológica en la región. La investigación se desarrolla en este ambiente académico y tiene como objetivo contribuir al desarrollo de la tecnología agrícola y brindar soluciones prácticas y aplicables a necesidades reales.

ÍNDICE

PREELIMINARES	2
Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Introducción	5
 CAPÍTULO I GENERALIDADES DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TEZIUTLÁN.....	 10
1.1 Datos generales de la institución	11
1.1.1 Antecedentes	11
1.1.2 Misión y visión.....	12
1.1.3 Valores	12
1.1.4 Macrolocalización y Microlocalización.....	12
1.2 Problema de investigación a resolver	13
1.3 Preguntas de investigación	13
1.4 Objetivos.....	14
1.4.1 Objetivo general	14
1.4.2 Objetivos específicos.....	14
1.5 Alcance	15
1.6 Justificación	15
 CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	 16
2.1 Robótica	17
2.1.1 Componentes de la robótica.....	17
2.2 Introducción a la robótica y los manipuladores.....	18
2.3 Robot manipulador	18
2.4 Historia de los robots manipuladores.....	19
2.5 Sistema de control	20
2.6 Estructura de robots manipuladores.....	21
2.6.1 Tipos de articulaciones	21

2.7	Estructuras básicas	23
2.8	Clasificación de manipuladores	24
2.8.1	Manipuladores articulados o RRR	25
2.8.2	Manipuladores polares o RRP	25
2.8.3	Manipuladores SCARA	26
2.8.4	Manipuladores cilíndricos o RPP	27
2.8.5	Manipuladores cartesianos o PPP	27
2.9	Elementos finales de los manipuladores.....	28
2.10	Descripciones: posiciones, orientaciones y tramas	29
2.10.1	Descripciones de una posición	29
2.11	Descripción de vínculos	29
2.12	Modelo directo del manipulador.....	31
2.13	El problema cinemático directo.....	31
2.14	Resolución del problema cinemático mediante matrices de transformación homogénea.	31
2.15	Modelo de Denavit-Hartenberg	32
2.16	Matrices de rotación básicas	34
2.17	Esfuerzos en vigas	34
2.18	Esfuerzos normales para vigas en flexión.....	35
2.19	Armaduras.....	35
2.20	Análisis de armaduras mediante el método de nodos	36
2.21	Fases e iteraciones del proceso de diseño.....	37
2.22	Consideraciones de diseño	38
CAPÍTULO III DESARROLLO Y METODOLOGÍA.....		39
3.1	Iteraciones de diseño para el brazo manipulador	40
3.2	Versión número 1 del brazo manipulador.....	40
3.2.1	Comparación de las propiedades de diseño de la versión 1 del brazo manipulador	41
3.3	Versión número 2 del brazo manipulador.....	42
3.3.1	Comparación de las propiedades de diseño de la versión 1 del brazo manipulador	43
3.4	Versión número 3 del brazo manipulador.....	44

3.4.1	Comparación de las propiedades de diseño de la versión 3 del brazo manipulador	45
3.5	Versión final del brazo manipulador	46
3.5.1	Comparación de las propiedades de diseño de la versión final del brazo manipulador.....	47
3.6	Cinemática directa del brazo manipulador.....	48
3.7	Cálculo de armadura de la viga 2.....	52
3.8.1	Resolución analítica de la viga 2 por el método de nodos.....	56
3.8	Cálculo de armaduras en viga 1.....	61
3.8.1	Resolución analítica de la viga 1 por el método de nodos.....	63
3.9	Alcances y enfoque de la investigación.....	69
3.10	Hipótesis	70
3.11	Diseño y metodología de la investigación.....	70
CAPÍTULO IV RESULTADOS.....		72
4.1	Resultados del análisis de armadura en viga	73
4.2	Material PLA para la impresión 3D	74
4.3	Datos del filamento.....	75
4.4	Resultados de diseño en viga	78
4.4.1	Tensión nodal VonMises en viga	79
4.4.2	Desplazamiento estático en X en la viga	81
3.8.5	Deformación unitaria normal en dirección a X en la viga.....	82
4.5	Resultados de diseño en viga completa	84
4.5.1	Tensión nodal VonMises en viga completa	85
4.5.2	Desplazamiento estático en Y en la viga completa	86
4.5.3	Deformación unitaria estática equivalente.....	87
4.6	Resultado de la hipótesis	88
CAPÍTULO V CONCLUSIONES		89
5.1	Conclusiones del proyecto, recomendaciones y experiencia profesional y personal adquirida.....	90
5.2	Conclusiones relativas a los objetivos específicos.....	90

5.3	Conclusiones relativas al objetivo general	91
5.4	Limitaciones del modelo planteado	92
5.5	Recomendaciones.....	93
CAPÍTULO VI COMPETENCIAS DESARROLLADAS		94
6.1.1	Competencias genéricas	95
6.1.2	Competencias específicas.....	96
CAPÍTULO VII FUENTES DE INFORMACIÓN.....		98
Bibliografía		99
CAPÍTULO VIII ANEXOS.....		101
Anexo A. Componentes del brazo recolector		102
Anexo B. Componentes de la garra		127
Anexo C. Carta de autorización del autor para la consulta y publicación electrónica del trabajo de investigación		130
Anexo D. Dictamen de comité revisor		131
Anexo E. Licencia de uso		132
Índice de Figuras.....		133
Índice de tablas		136

CAPÍTULO I GENERALIDADES DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TEZIUTLÁN

1.1 Datos generales de la institución

1.1.1 Antecedentes

El Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán (ITST) es una institución educativa de nivel superior ubicada en la ciudad de Teziutlán, en el estado de Puebla, México. Con el objetivo de ofrecer educación superior de calidad en áreas de relevancia para el desarrollo regional y nacional.

En 1993, el Gobernador del Estado, Manuel Bartlett Díaz, escuchando la petición popular y la intervención de funcionarios públicos y empresarios interesados, gestionó ante la Secretaría de Educación Pública, dirigida por Ernesto Zedillo Ponce de León, la creación de una Institución de Educación Superior Tecnológica, acción que se vería concretada el 8 de noviembre de 1994 con la publicación del Decreto del Congreso del Estado que expide la ley que crea "Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán", como Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado, con personalidad jurídica y patrimonio propio.

El día 22 de abril de 1998 fue nombrado oficialmente el Ing. Alberto Sánchez Serrano como nuevo director del Instituto tecnológico Superior de Teziutlán, iniciando una nueva etapa en la vida de esta institución trayendo consigo cambios sustanciales tales como:

Impulso y mejoramiento en el aspecto académico del Instituto. Mejoramiento a sistemas de control en el área administrativa, realización de gestiones permanentes para la construcción y equipamiento del centro de cómputo, así como de dos edificios más, mejoras en la infraestructura física (interior y exterior), creación de nuevas carreras, realización de convenios para estudios de posgrado e investigación, proyección del Instituto hacia el sector productivo, industrial y social.

Desde sus inicios, el ITST ha tenido un enfoque en la formación de profesionales altamente capacitados en diversas disciplinas, como ingeniería, tecnología, administración y ciencias sociales. A lo largo de los años, ha consolidado una reputación como un centro educativo de excelencia, atrayendo a estudiantes de diversas partes del país y contribuyendo al desarrollo humano y tecnológico de la región.



Figura 1. Zona de influencia del Tecnológico Superior de Teziutlán a 30Km. Fuente: ITST, 2019

El área espacial del Instituto es de 12 hectáreas, donde se encuentra un conjunto de 06 edificios conformado por:

1. Edificio de Unidad Administrativa
2. Laboratorio de Química
3. Edificio de Biblioteca, Dirección General
4. Edificio de Unidad Académica
5. Edificio Multifuncional de Talleres y Laboratorios
6. Aulas

1.1.2 Misión y visión

El Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, atento a las demandas de la sociedad, y a los principios de la Ley de Educación del Estado de Puebla, se consolida como una Institución cuyo objetivo es lograr una educación de calidad, moderna y eficaz, orientada al servicio, acercándola a las necesidades e intereses de la población, que promueva el uso transparente y eficiente de los recursos humanos, materiales y financieros de que disponga, y que cumpla puntualmente con sus programas de trabajo.

1.1.3 Valores

Los valores fundamentales del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán están arraigados en el compromiso con la excelencia académica, la ética profesional y el desarrollo integral de sus estudiantes. Los valores institucionales son los siguientes:

- Excelencia académica
- Ética y responsabilidad
- Inclusión y diversidad
- Trabajo en equipo
- Compromiso social

1.1.4 Macrolocalización y Microlocalización

El Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán está ubicado en las montañas de Puebla, México. Este macro posicionamiento puede brindarle a la institución varias ventajas geográficas y logísticas para su desarrollo educativo y tecnológico.

Rodeada de una rica biodiversidad y una vibrante comunidad local, la universidad está ubicada en un lugar accesible y conectado con las principales carreteras y rutas de transporte público, lo que brinda comodidad a los estudiantes locales o foráneos.

Este Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán se encuentra dentro de la ciudad de Teziutlán, la microlocalización del Instituto Tecnológico Superior se encuentra en una posición estratégica en relación con las infraestructuras y servicios clave. El campus está situado en una zona con seguridad y bien comunicada, con acceso a

instalaciones de transporte público y avenidas principales que facilitan el desplazamiento de estudiantes, profesores y personal. Además, la cercanía a centros comerciales, servicios de salud y opciones de alojamiento contribuye a la comodidad y bienestar de la comunidad académica.



Figura 2. Ubicación del ITST. Fuente: Maps

1.2 Problema de investigación a resolver

En la industria cafetera, la recolección manual de granos de café es una mano de obra intensiva y susceptible a errores humanos, lo que puede afectar negativamente la calidad del producto final. Además, en plantaciones ubicadas en terrenos empinados o con condiciones geográficas desafiantes y complicadas, el proceso manual se vuelve aún más complejo y lento, aumentando así el riesgo de la salud e incluso la vida del obrero. La necesidad de una solución tecnológica que mejore la eficiencia y la precisión en la recolección de granos de café se presenta como una demanda apremiante para los agricultores y productores de café. Esto implica la necesidad de una propuesta de diseño que no solo sea efectiva en la recolección, sino también flexible y ajustable para satisfacer las necesidades cambiantes de diferentes plantaciones de café.

1.3 Preguntas de investigación

- ¿Cómo se garantizará la viabilidad y funcionalidad del prototipo del brazo manipulador desarrollado mediante la técnica de impresión 3D, empleando PLA como material de construcción, y cuál será el enfoque para la evaluación y ajuste posterior del mismo?
- ¿Cuáles son los movimientos y grados de libertad esenciales considerados en el análisis cinemático del brazo manipulador diseñado, y cómo se asegurará que este análisis garantice su correcto funcionamiento en diversas situaciones?

- ¿Cómo se utilizará la información recabada durante la visita al cafetalero para elaborar el diseño detallado y realizar la simulación del brazo manipulador mediante herramientas CAD, asegurando una adaptación óptima a las condiciones específicas de la plantación de café identificadas durante la visita?
- ¿Cuáles son los datos y medidas específicas que se recopilarán durante la visita al cafetalero para facilitar la precisa adaptación y diseño de un dron destinado a la cosecha de granos de café, y cómo se integrarán estos datos en el proceso de diseño del dron?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un brazo manipulador para la cosecha de granos de café mediante herramientas de CAD, incluyendo el análisis cinemático, con el fin de construir un modelo funcional a escala utilizando técnicas de manufactura aditiva.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un prototipo del brazo manipulador utilizando la técnica de impresión 3D, empleando PLA como material de construcción, para materializar el diseño conceptual del brazo manipulador, utilizando tecnologías de impresión 3D y asegurando la viabilidad y funcionalidad del prototipo para su posterior evaluación y ajuste.
2. Conducir un análisis cinemático del brazo manipulador diseñado, teniendo en cuenta los movimientos y grados de libertad esenciales para garantizar su correcto funcionamiento.
3. Elaborar el diseño detallado y realizar la simulación del brazo manipulador mediante el uso de herramientas CAD, tomando como referencia la información recabada durante la visita al cafetalero. Esto garantizará que el diseño del brazo manipulador se adapte de manera óptima a las condiciones específicas de la plantación de café identificadas durante la visita.
4. Llevar a cabo una visita al cafetalero de la región con el objetivo de recopilar medidas y datos específicos necesarios para la precisa adaptación y diseño de un dron destinado a la cosecha de granos de café. Esto incluirá la obtención de dimensiones de la plantación, espaciado entre las plantas y el análisis detallado de las características topográficas del terreno.

1.5 Alcance

El impacto del proyecto está orientado al sector de agricultura, principalmente en el área del cultivo de café en el área de Teziutlán, Puebla. Dentro de la misma se puede observar el diseño del brazo recolector, así como sus cálculos cinemáticos con las medidas establecidas considerando previamente las condiciones del cafetalero visitado para así llegar a desarrollar un prototipo utilizando la técnica de impresión 3D, ocupando PLA como material.

1.6 Justificación

La presente investigación surge en respuesta a la relevancia que tiene la industria cafetalera en México, particularmente en el estado de Puebla, donde se sitúa en el tercer lugar nacional en producción de café, según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA)(México, 2023). La necesidad de optimizar la recolección de granos de café en esta región se evidencia ante los desafíos significativos asociados con la recolección manual, tales como riesgos laborales, incremento en costos y posibles afectaciones a la calidad del producto final.

La recolección manual, tradicionalmente utilizada en las plantaciones de café en Puebla debido a su topografía montañosa, enfrenta limitaciones que afectan tanto la productividad como la calidad del grano. Los costos laborales asociados no solo abarcan salarios, sino también gastos relacionados con la vivienda y condiciones laborales adecuadas, impactando la rentabilidad de los productores y su competitividad en el mercado.

La propuesta de diseño y análisis cinemático de un brazo manipulador robótico busca superar estas limitaciones inherentes al proceso manual. El enfoque específico en el diseño adaptado a las condiciones geográficas de Puebla, junto con la aplicación de la tecnología robótica, ofrece la posibilidad de mejorar la eficiencia, velocidad y precisión de la cosecha, beneficiando tanto a productores como a consumidores.

La implementación de un brazo manipulador automatizado tiene el potencial de transformar la forma en que se cosechan los granos de café en la región, mejorando la calidad del grano y optimizando la productividad. La automatización no solo reduce el tiempo necesario para la recolección, sino que también mitiga los riesgos asociados con el trabajo manual, como daños por manipulación incorrecta, caídas y movimientos bruscos, preservando así la integridad de los granos.

La tesis no solo se centra en la teoría y el diseño conceptual, sino que aspira a impulsar la implementación de soluciones robóticas en el campo. Al abordar un problema concreto en la agricultura de Puebla, esta investigación sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el ámbito de la robótica agrícola, con posibles innovaciones y mejoras continuas en la recolección automatizada de granos de café. Además, la propuesta podría abrir nuevas oportunidades de investigación y contribuir a la mejora de las prácticas agrícolas en la industria cafetalera.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Robótica

La robótica es la disciplina que cubre el diseño, construcción, operación y programación de sistemas automatizados llamados robots que pueden realizar tareas de forma autónoma o semiautónoma.

Craig explica que la robótica es: "La ciencia y tecnología del diseño, fabricación y aplicación de robots" (Craig J. J., 2005)

Este es un campo de trabajo que combina diversas disciplinas como ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica, ingeniería mecánica, física, matemáticas, informática, etc.

2.1.1 Componentes de la robótica

1. Estructura Mecánica: Los robots son sistemas físicos con componentes mecánicos que les permiten moverse y realizar acciones en su entorno.
2. Actuadores y Sensores: Los actuadores, como motores y servomotores, son responsables de generar movimiento en las articulaciones del robot. Los sensores, como cámaras y sensores de proximidad, permiten al robot percibir su entorno.
3. Control y Programación: Los robots requieren sistemas de control para ejecutar tareas específicas. La programación abarca desde la definición de movimientos hasta la toma de decisiones basadas en datos y algoritmos.
4. Inteligencia artificial y aprendizaje automático: La integración de la inteligencia artificial y el aprendizaje de manera automática permite que los robots se adapten a situaciones cambiantes, aprendan de la experiencia y tomen decisiones informadas.
5. Interacción Humano-Robot: La robótica también se centra en cómo los humanos y los robots interactúan de manera segura y eficiente, incluyendo interfaces de usuario, comunicación y colaboración.

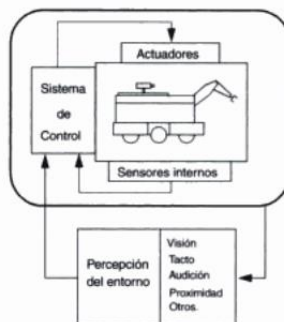


Figura 3. Robot y su interacción con el entorno. Fuente: (Ollero, 2001).

2.2 Introducción a la robótica y los manipuladores

El concepto de "Robótica" fue introducido en nuestro vocabulario por el escritor checo Karel Čapek (1890-1938) en su obra "Rossum's Universal Robots" en 1920. En esta obra, Čapek acuñó el término "robot" para referirse a entidades artificiales creadas por el hombre que imitan a los humanos y desempeñan funciones laborales.

La robótica, como disciplina interdisciplinaria, abarca áreas como la ingeniería mecánica, electrónica y control automático. La comprensión de los conceptos fundamentales en la introducción a la robótica y manipuladores es esencial para el diseño, operación y aplicación de sistemas robóticos. Estos sistemas son capaces de interactuar con su entorno y llevar a cabo tareas específicas de manera autónoma o semiautónoma. La robótica involucra conocimientos y principios provenientes de campos como la ingeniería mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial y la mecánica de control.

La palabra "Robótica" fue utilizada por primera vez por el científico y escritor de ciencia ficción Isaac Asimov en 1942, además, el propuso las llamadas leyes de la robótica. (Craig J. J., 2005)

Las tres leyes, tal como las formuló Asimov en su obra "Runaround" (1942):

1. Primera Ley: "Un robot no puede hacer daño a un ser humano ni, por inacción, permitir que un ser humano sufra daño."
2. Segunda Ley: "Un robot debe obedecer las órdenes dadas por los seres humanos, excepto si estas órdenes entran en conflicto con la Primera Ley."
3. Tercera Ley: "Un robot debe proteger su propia existencia en la medida en que esta protección no entre en conflicto con la Primera o la Segunda Ley."

Posteriormente, Asimov añadió una "Ley Cero" en su novela "Robots and Empire" (1985):

Ley Cero: "Un robot no puede hacer daño a la humanidad ni, por inacción, permitir que la humanidad sufra daño." Estas leyes se han convertido en conceptos influyentes en muchos ámbitos y los debates éticos sobre la inteligencia artificial y la robótica, aunque su implementación en la práctica plantea cuestiones y problemas éticos más profundos.

2.3 Robot manipulador

(Siciliano, (eds.) 2008) define:

"Un robot manipulador es un sistema mecánico compuesto por enlaces

conectados por articulaciones, diseñado para interactuar con su entorno mediante movimientos controlados de sus articulaciones para lograr tareas específicas."

(Craig J. J., 2005) define:

"Un robot manipulador es un sistema mecánico multifuncional compuesto por elementos mecánicos conectados de tal manera que su movimiento relativo, controlado por medio de un sistema de control, permite llevar a cabo diversas tareas."

(Russell, 2016) define:

"Un robot manipulador es una máquina programable capaz de mover objetos o herramientas a través de una serie de movimientos variables y programables, con el objetivo de realizar tareas específicas."

2.4 Historia de los robots manipuladores

El primer brazo articulado (o manipulador) fue construido en 1938 por Harold Roselund de la ya desaparecida compañía Devilviss. Se utilizaba para pintura en "spray". En aquella época no existían los ordenadores digitales y programar para una tarea concreta era muy difícil, por lo que los primeros robots fracasaron. Los operadores de control remoto se desarrollaron durante la Segunda Guerra Mundial. George Devore es considerado el "padre del robot". En 1946, inventó un dispositivo mecánico que permitía a las máquinas repetir una serie de movimientos. Ese mismo año, Eckert y Mauchly crearon el Eniac, el primer ordenador digital. En 1952, se construyó la primera herramienta CNC en el MIT, el mismo año en que Devol recibió la primera patente para un brazo robótico con memoria. El dispositivo era capaz de mover herramientas de trabajo de un punto a otro. En 1957, Planet produjo el primer robot comercial. En 1960, Devol vendió la patente a Condec Corporation, que comenzó a fabricar el robot Unimate. En 1962, General Motors instaló el primer Unimation en su planta de fundición.

Desde 1965, varios centros de investigación importantes, como el MIT y el SRI, iniciaron investigaciones en robótica y campos relacionados. En 1970, SRI produjo un manipulador controlado por computadora con seis grados de libertad y utilizó servomotores PID y DC para el control de movimiento cíclico. Hasta ahora, todos los robots manipuladores estaban equipados con actuadores hidráulicos. El primer robot controlado por microcomputadora fue producido en 1973 por Milacron Corporation en Cincinnati. En 1978 Unimation en Cincinnati. En 1978 Unimation desarrolla PUMA.

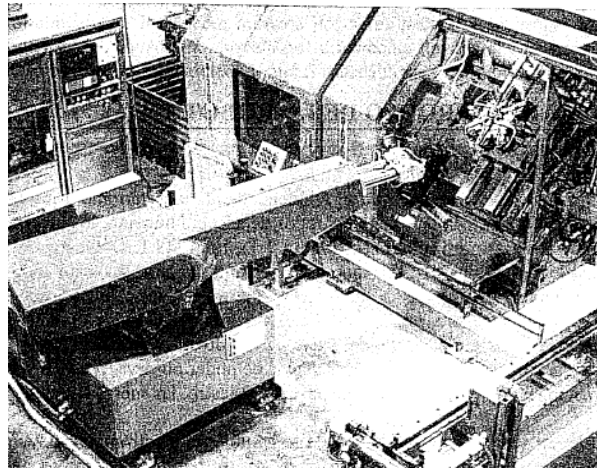


Figura 4. Robot Unatime 2000. Fuente: Barrientos, Antonio, *Fundamentos de Robótica*, (2007).

La primera configuración del robot responde a las denominadas configuraciones esféricas y antropomorfas, que resultan especialmente útiles para la manipulación.

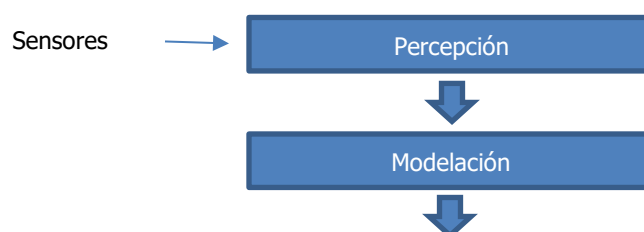
Antonio Barrientos en su libro *Fundamentos de la Robótica* explica que:

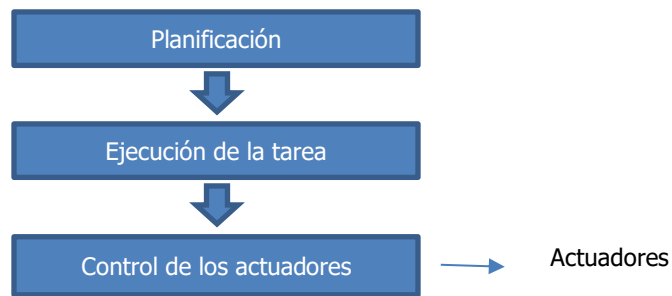
“En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla en concepto de robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) que busca un robot con un número reducido de grados de libertad (3 o 4), un coste limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas.” (Barrientos, 2007)

Desde su nacimiento, los robots industriales han experimentado enormes cambios en su desarrollo. Desde hace más de 30 años, la investigación y el desarrollo de robots industriales ha permitido que los robots ocupen un lugar e importancia en casi todos los ámbitos de la producción y en todo tipo de industrias. En fábricas pequeñas o grandes, los robots pueden reemplazar a los humanos en tareas repetitivas y hostiles y adaptarse instantáneamente a los cambios en la producción impulsados por la demanda cambiante.

2.5 Sistema de control

La función de este sistema es controlar las acciones que realiza el robot para que pueda realizar las tareas que tiene asignadas teniendo en cuenta la información del entorno. Este sistema de control corresponde a una especie de sistema nervioso de robot, cuya complejidad puede variar, del mismo modo que los sistemas nerviosos de diferentes animales y humanos en los que varían en complejidad.





2.6 Estructura de robots manipuladores

Los robots manipuladores son esencialmente brazos articulados. Más precisamente, el manipulador industrial tradicional es una cadena cinemática abierta, la cual está formada por un conjunto de eslabones o elementos conectados a través de eslabones o pares cinemáticos, como se muestra en la figura 5. Las articulaciones permiten un movimiento relativo entre articulaciones sucesivas.

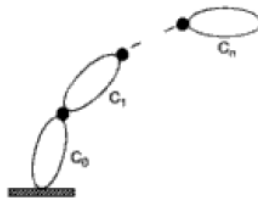


Figura 5. Cadena Cinemática abierta. Fuente: (Ollero Baturone, 2001).

2.6.1 Tipos de articulaciones

Existen diferentes tipos de articulaciones, las más utilizadas en robótica son las articulaciones que se muestran en la figura 6. Las juntas rotativas proporcionan un grado de libertad de rotación alrededor del eje de la articulación y son las más comunes.

Las articulaciones del robot se mueven mediante dispositivos llamados actuadores. Estos actuadores pueden ser hidráulicos, neumáticos o eléctricos. Los actuadores están conectados a las articulaciones del robot. Si las articulaciones son independientes, con una única dirección de movimiento o rotación con respecto a un eje determinado, el manipulador tiene tantas articulaciones como grados de libertad tiene el manipulador. Pero las articulaciones pueden tener varios grados de libertad. En este caso, el número de juntas diferirá del número de grados de libertad del manipulador. Sin pérdida de generalidad, se puede considerar que un robot tiene solo un grado de libertad de articulación, ya que, si una articulación tiene m grados de libertad, puede considerarse como un conjunto de m uniones de un solo grado de libertad conectadas entre sí mediante enlaces cuya longitud es cero. Generalmente, la letra R se usa para indicar una junta rotativa y la letra P se usa para indicar una junta prismática. Otros tipos de juntas comunes son las juntas

cilíndricas de dos grados de libertad, las juntas planas de dos grados de libertad y las juntas esféricas de tres grados de libertad.

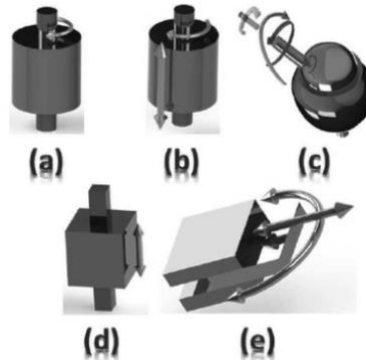


Figura 6. Articulaciones comunes en robots manipuladores: (a) rotacional con 1-GDL; (b) cilíndrica con 2-GDL; (c) esférica con 3-GDL; (d) prismática con 1-GDL; (e) planar con 2-GDL. Fuente: (Ferraté & otros, 1986).

Los grados de libertad son el número de parámetros independientes que determinan el estado final de la pieza. Esto se puede ver en la figura 7a, donde observamos una estructura con dos enlaces, dos enlaces prismáticos y dos grados de libertad. Sin embargo, puede haber algunos casos, como se muestra en la figura 7b, donde observamos que, aunque hay dos enlaces y dos enlaces prismáticos, tiene solo un grado de libertad. Por tanto, el número de grados de libertad suele ser menor o igual al número de eslabones de la cadena cinemática.



Figura 7. Pérdida de grados de libertad en estructura con dos eslabones: a) dos grados de libertad y b) un grado de libertad.

Si se requiere mover un cierto elemento a cualquier punto en el espacio, es posible hacerlo moviéndose a lo largo de los tres ejes x , y , z . Si además se quiere que dicho objeto tenga una orientación deseada, deberá de rotarse con respecto a cualquiera de dichos ejes. Por lo tanto, para que un robot pueda posicionarse en cualquier punto del espacio en cualquier dirección, debe tener al menos seis grados de libertad, porque si el número de grados de libertad es menor, el robot no puede alcanzar ningún punto del espacio en cualquier dirección. Los robots manipuladores con más de seis grados de libertad se denominan manipuladores redundantes.

2.7 Estructuras básicas

En primer lugar, consideremos las estructuras más utilizadas como brazos robóticos. Estas estructuras tienen características diferentes en cuanto a lugar de trabajo y accesibilidad a determinados lugares. Un espacio de trabajo es un conjunto de puntos donde se puede colocar el efector final de un brazo robótico. Corresponde al volumen delimitado por la superficie que define los puntos visitados por los manipuladores con estructuras completamente extendidas y completamente plegadas.

La parte final del robot suele estar conectada a una herramienta o dispositivo específico para realizar una tarea específica llamada efector final. Cuando el robot realiza cualquier movimiento posible, el volumen total abarcado por el efector final se denomina espacio de trabajo. Las áreas de trabajo del manipulador se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Área de trabajo disponible. Este es el conjunto de puntos que puede alcanzar el robot.
- Espacio de trabajo eficiente. Estos son los puntos que el robot puede alcanzar en todas direcciones.

Por otro lado, no todos los puntos del espacio de trabajo son igualmente accesibles. Los puntos de mínima accesibilidad son puntos de la superficie que definen el espacio de trabajo porque solo se puede llegar a ellos desde una dirección.

Según (Miranda Colorado, 2016) en su libro Cinemática y dinámica de robots manipuladores existen otros elementos que forman parte del sistema robótico. Entre estos elementos se encuentran:

1. "Sistema de potencia. Puede contener una fuente de alimentación y amplificadores que permiten generar las señales requeridas por los actuadores."
2. "Efector final. Dependiendo de la tarea que tenga el robot, se pueden tener distintos tipos de efectores finales."
3. "Sensores. Permiten medir distintas señales útiles para controlar al robot manipulador."
4. "Controlador. Normalmente se trata de un dispositivo computacional que realiza los cálculos para que el robot desarrolle las tareas para las que fue diseñado. El controlador normalmente recibe información de programas base, así como de sistemas de enseñanza los cuales le permiten mejorar su desempeño."

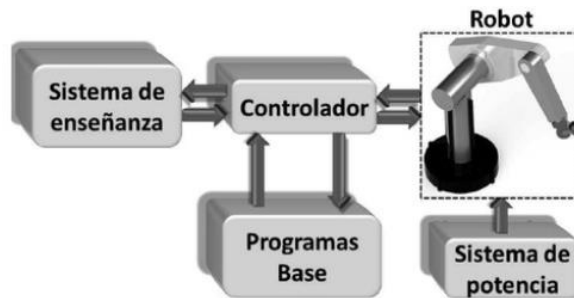


Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema robótico. Fuente: (Miranda Colorado, 2016).

En las tareas realizadas por los robots manipuladores es importante clarificar el concepto de precisión, el cual proporciona una medida de la cercanía con que el manipulador regresa a una posición aprendida con anterioridad. Entre más preciso sea un robot mejor será su desempeño. El modelado de los robots manipuladores es importante debido a que al modelar se suelen hacer ciertas consideraciones que simplifican el sistema considerado. Sin embargo, estas simplificaciones generan errores que tendrán un impacto en la precisión del robot.

2.8 Clasificación de manipuladores

Existen muchas posibilidades para clasificar a los robots manipuladores. Por ejemplo, la clasificación puede tomar en cuenta la aplicación del robot, el tipo de control empleado, la estructura cinemática del manipulador, o la geometría del robot. (Spong & Vidyasagar, 1989)

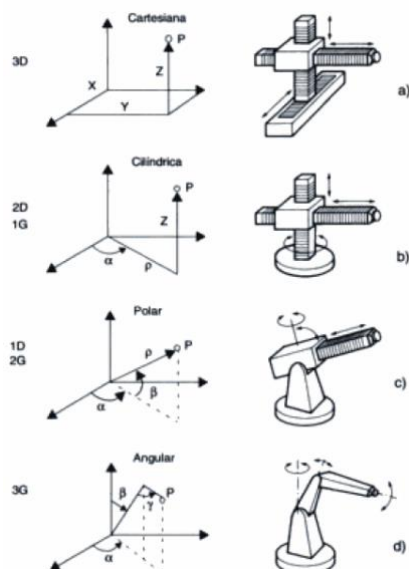


Figura 9. Configuraciones de robots manipuladores industriales. Fuente: (Ferraté & otros, 1986).

Considerando la geometría, los tres primeros eslabones del robot que permiten su posicionamiento se pueden clasificar en: manipulador articulado (angular) o RRR, manipulador RRP (polar o SCARA), manipulador cilíndrico o RPP y manipulador cartesiano o PPP.

2.8.1 Manipuladores articulados o RRR

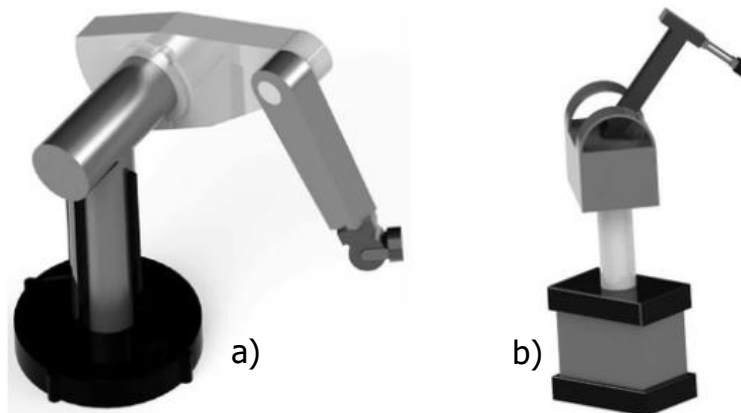


Figura 10. a) Manipulador PUMA (Programmable Universal Manipulator Assembly). b) Manipulador Cincinnati Milacron T^3 735. Fuente: (Miranda Colorado, 2016).

A veces se les llama manipuladores giratorios o antropomórficos. Las tres primeras articulaciones de estos manipuladores son giratorias. Ejemplos de dichos manipuladores son el PUMA (figura 10a) o el Cincinnati Milacron T^3 735 (figura 10b).

Por mencionar un beneficio es que permiten una variedad de movimientos en espacios reducidos. Esta configuración es una estructura con tres juntas giratorias (3G o RRR). Por supuesto, la ubicación del punto final se indica en coordenadas angulares. La estructura proporciona un mejor acceso a espacios cerrados y es ligera desde el punto de vista constructivo. Es muy utilizado en robots manipuladores industriales, especialmente para tareas de manipulación de cierta complejidad. Los controladores de robots con brazos estructurales angulares tienen que realizar tareas más complejas porque, como se mencionó anteriormente, las trayectorias generalmente se especifican en coordenadas cartesianas y, por lo tanto, se deben realizar las transformaciones apropiadas.

2.8.2 Manipuladores polares o RRP

Los robots manipuladores esféricos entran en esta categoría. Su nombre proviene del hecho de que la posición del efector final se puede describir en coordenadas esféricas. Un ejemplo de este tipo de robot es el manipulador Stanford que se

muestra en la figura 11. En estos manipuladores, las dos primeras articulaciones son giratorias y la tercera articulación es prismática.

(Miranda Colorado, 2016) en su libro Cinemática y dinámica de robots manipuladores explica que:

"En un manipulador con tres enlaces de longitud L , el volumen de trabajo de esta estructura, suponiendo un radio de giro de 360 grados y un rango de desplazamiento de L , es el que existe entre una esfera de radio $2L$ y otra concéntrica de radio L . Por consiguiente, el volumen es $(28/3)\pi L^3$ ".



Figura 11. Manipulador Stanford. Fuente: (Miranda Colorado, 2016)

2.8.3 Manipuladores SCARA

Esta configuración está pensada para trabajos de montaje sobre una superficie plana. Consta de dos articulaciones para rotación alrededor de dos ejes paralelos y una articulación para desplazamiento en una dirección perpendicular al plano.

En la figura 12 se muestra un robot industrial Scara. Según Aníbal Ollero: "El volumen de trabajo de este robot, suponiendo segmentos de longitud L , un radio de giro de 360 grados y un rango de desplazamiento de L es de $4\pi L^3$ ". (Ollero Baturone, 2001)

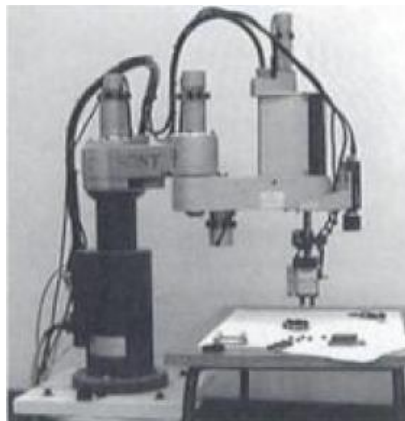


Figura 12. Robot SCARA en los laboratorios del Instituto Andaluz de Automática y Robótica, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Fuente: (Ollero Baturone, 2001)

2.8.4 Manipuladores cilíndricos o RPP

En la figura 13 se muestra un ejemplo de la estructura robótica de estos manipuladores. Para estos robots, las variables de acoplamiento se pueden expresar en términos de las coordenadas cilíndricas del efector final con respecto a la base. Su primera articulación es rotativa, mientras que las dos siguientes son prismáticas. Esta configuración tiene dos juntas prismáticas y una junta rotacional (2D, 1G). La primera articulación suele ser rotativa (estructura RPP). Por supuesto, la posición se da en coordenadas cilíndricas.

Esta configuración puede resultar interesante para células flexibles, donde un robot situado en el centro de la célula acciona varias máquinas dispuestas radialmente a su alrededor.

Roger Miranda en su libro *Cinemática y dinámica de robots manipuladores* explica que: "El volumen de trabajo de esta estructura RPP (o de la PRP), suponiendo un radio de giro de 360 grados y un rango de desplazamiento de L . es el de un toro de sección cuadrada de radio interior L y radio exterior $2L$. Se demuestra que el volumen resultante es $3\pi L^3$ ". (Miranda Colorado, 2016)



Figura 13. Manipulador cilíndrico. Fuente: (Miranda Colorado, 2016)

2.8.5 Manipuladores cartesianos o PPP

Como se muestra en la figura 14. Esta configuración tiene tres conexiones prismáticas (estructura 3D o PPP). Esta configuración es muy común en estructuras industriales como pórticos utilizados para transportar mercancías voluminosas.

Se utilizan coordenadas rectangulares (x , y y z) para especificar la ubicación del punto. Las variables de conexión deben tomar valores que correspondan exactamente a las coordenadas del extremo del brazo. Por lo tanto, la tarea del controlador del robot en esta configuración se simplifica, y el controlador del robot debe generar comandos para ejecutar una trayectoria definida por una secuencia de puntos representados por coordenadas cartesianas.

Sin embargo, esta configuración no es adecuada para acceder a puntos ubicados en espacios relativamente cerrados y requiere menos esfuerzo que otras configuraciones. Si hay segmentos de variación L , el volumen de trabajo sería L^3 .

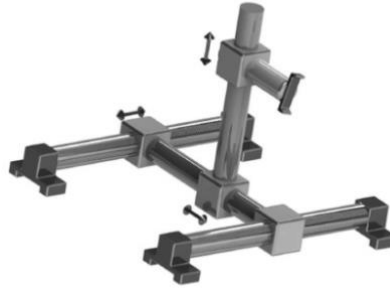


Figura 14. Estructura de un manipulador cartesiano. Fuente: (Miranda Colorado, 2016)

2.9 Elementos finales de los manipuladores

Como se mencionó anteriormente, el movimiento de un brazo robótico equipado con una muñeca efectora terminal generalmente se realiza en dos pasos. Primero mueva la mano para posicionar el extremo de la última articulación, luego ajuste la muñeca para que el efector final tenga la orientación correcta. Sin embargo, algunas tareas pueden requerir movimientos simultáneos de manos y muñecas.

Una vez que se tiene una estructura específica de un manipulador, es importante considerar el elemento que permitirá el movimiento del efector final.

La muñeca esférica posee tres GDL y permite al robot proporcionar una orientación deseada a un objeto manipulado. Este dispositivo favorece las capacidades de un robot, permitiéndolo realizar con precisión las tareas deseadas. En la tarea de montaje plano anterior, es posible que no necesite grados de libertad adicionales porque siempre trabaja perpendicular al plano de montaje, como cuando ensambla componentes electrónicos. Sin embargo, en otras tareas de manipulación, el efector final suele necesitar una orientación espacial específica. Esto se logra utilizando la muñeca del brazo robótico. La figura 15 muestra un manipulador de ángulo montado en un brazo que le da a la estructura tres grados de libertad de rotación. Estos tres ángulos nos permiten especificar la orientación del efector final en el espacio. De esta forma obtenemos los seis grados de libertad (tres para la mano y tres para la muñeca) necesarios para especificar de forma general la posición y orientación en el espacio.

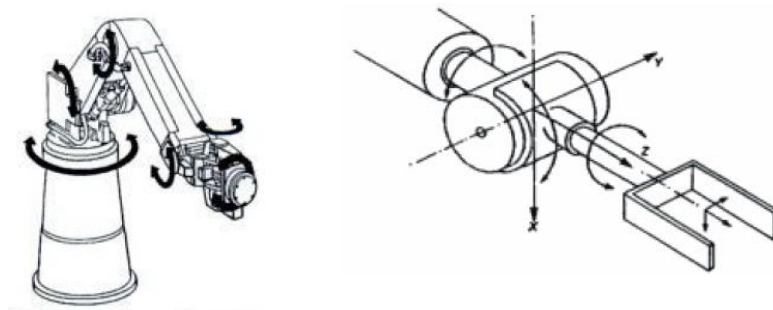


Figura 15. Manipulador con configuración angular y muñeca con 3GDL. Fuente: (Ferraté & otros, 1986)

2.10 Descripciones: posiciones, orientaciones y tramas

Éstas describen las propiedades de varios objetos utilizados para especificar un sistema de procesamiento. Estos elementos son piezas, herramientas y el propio manipulador.

2.10.1 Descripciones de una posición

Una vez establecido un sistema de coordenadas, podemos utilizar un vector de posición de orden 3×1 para localizar cualquier punto del universo. Dado que normalmente definimos muchos sistemas de coordenadas, además del sistema de coordenadas universal, el vector también debe etiquetarse con información que identifica el sistema en el que están definidos.

Craig en su libro *Introduction to robotics: mechanics and control* nos explica que: "La fórmula representa el dibujo de un sistema de coordenadas llamado $\{A\}$, con tres vectores unitarios mutuamente ortogonales con puntas sólidas. Un punto ${}^A P$ se representa como un vector y puede definirse de manera equivalente como una posición en el espacio, o simplemente como un conjunto ordenado de tres números. Dados los subíndices x, y y z , los elementos individuales de un vector son:" (Craig J. J., 2005)

$${}^A P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$$

2.11 Descripción de vínculos

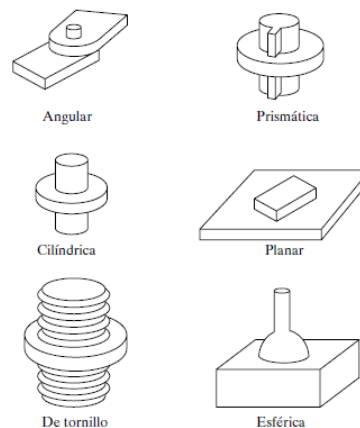


Figura 16. Seis posibles articulaciones de par menor. Fuente: (Craig J. J., 2005)

Se puede pensar en un manipulador como un conjunto de objetos conectados por eslabones a una cadena. Estas entidades se denominan enlaces o secciones. Las conexiones forman una conexión entre pares adyacentes de eslabones de cadena. El término "subpar" se utiliza para describir una conexión entre un par de objetos cuando el movimiento relativo se caracteriza por el deslizamiento de las dos superficies entre sí. La figura 17 muestra seis posibles conexiones de bajo torque. Las consideraciones de diseño mecánico sugieren que los manipuladores normalmente constan de uniones con un solo grado de libertad. La mayoría de los brazos de los robots tienen articulaciones basculantes o deslizantes llamadas articulaciones prismáticas.

Craig nos explica que: "En el extraño caso de que un mecanismo esté construido con una articulación que tengan grados de libertad, puede modelarse como n articulaciones de un grado de libertad, conectadas con $n - 1$ vínculos de longitud cero. Por lo tanto, y sin perder la generalidad, consideraremos sólo manipuladores que tengan articulaciones con un solo grado de libertad." (Craig J. J., 2006)

Los eslabones se numeran a partir de la base fija del brazo, que podemos llamar Eslabón 0. El primer cuerpo en movimiento es el eslabón 1, y así hasta llegar al extremo libre del brazo, que es el eslabón n . Se requiere un mínimo de seis conexiones para colocar generalmente un efector final en el espacio 3D. Los manipuladores convencionales tienen cinco o seis articulaciones.

En realidad, algunos robots no son tan simples como las cadenas cinemáticas abiertas. Tienen configuraciones de paralelogramo u otras estructuras cinemáticas cerradas. Una articulación de robot típica tiene muchas propiedades que los ingenieros mecánicos deben considerar en el proceso de diseño: el tipo de material utilizado, la resistencia y rigidez de la articulación, la ubicación y el tipo de cojinetes esféricos, la forma externa, el peso y la inercia, etc. .. Sin embargo, si es necesario obtener las ecuaciones cinemáticas del mecanismo, la biela se considera sólo como un cuerpo rígido que determina la relación entre los dos ejes de los eslabones adyacentes del manipulador. Los ejes de las articulaciones están definidos por líneas en el espacio. El eje de la articulación i está determinado por la dirección de la línea o vector en el espacio alrededor del cual la articulación i gira en relación con la articulación $i-1$. Un enlace puede indicarse mediante dos números que determinan la posición relativa de los dos ejes en el espacio.

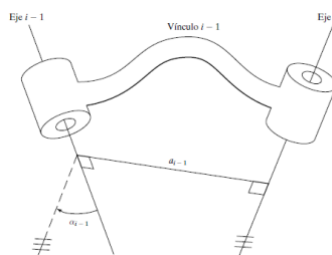


Figura 17. El desplazamiento del vínculo d y el ángulo de articulación θ , son dos parámetros que pueden usarse para describir la naturaleza de la conexión entre vínculos adyacentes. Fuente: (Craig J. J., 2005)

2.12 Modelo directo del manipulador

El modelo directo está dado por una función que permite expresar la posición y orientación del sistema de referencia objetivo en el espacio cartesiano (operación o tarea) p en términos de las variables articulares q :

$$p = \varphi(q)$$

q es un grupo de funciones no lineales.

Una vez conocidas las variables normales (entradas), queremos saber dónde está el manipulador. Para crear un modelo directo de un robot en particular, existen dos alternativas típicas:

- Uso de relaciones específicas del robot: Esto incluye el uso de relaciones geométricas que se pueden crear en el robot en cuestión.
- Enfoque general: implica el uso de matrices de transformación relacionadas con el marco de referencia definido en el capítulo anterior.

2.13 El problema cinemático directo

El álgebra vectorial y matricial se utiliza básicamente para representar y describir la posición de objetos en un espacio tridimensional en relación con un marco de referencia fijo. Dado que el robot puede considerarse como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos por eslabones, en la base del robot se puede establecer un marco de referencia fijo y la posición de cada eslabón con respecto al marco de referencia. De esta forma, el problema de la cinemática directa se reduce a encontrar una matriz de transformación homogénea T que relacione la posición final y la orientación del robot con respecto a un sistema de referencia fijo situado en su base. Esta matriz T será función de las coordenadas conjuntas.

2.14 Resolución del problema cinemático mediante matrices de transformación homogénea.

La solución al problema de la cinemática directa pasa por encontrar relaciones que permitan comprender la posición espacial del robot en función de sus valores de coordenadas totales en sus extremidades. Las coordenadas cartesianas y los ángulos de Euler representan la posición final y la orientación del robot.

La solución del problema de cinemática directa viene dada por las siguientes condiciones según (Barrientos, 2007) en su libro "Fundamentos de la robótica":

$$\begin{aligned}x &= f_x(q_1, q_2 \dots q_n) \\y &= f_y(q_1, q_2 \dots q_n)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
z &= f_z(q_1, q_2 \dots q_n) \\
\alpha &= f_\alpha(q_1, q_2 \dots q_n) \\
\beta &= f_\beta(q_1, q_2 \dots q_n) \\
\gamma &= f_\gamma(q_1, q_2 \dots q_n)
\end{aligned}$$

Obtener estas proporciones no suele ser difícil y, en algunos casos (robots con pequeños grados de libertad), incluso se pueden encontrar fácilmente mediante consideraciones geométricas simples.

Además, lo dice (Barrientos, 2007), para un robot de 2 GDL, es fácil comprobar que:

$$\begin{aligned}
x &= l_1 \cos q_1 \ l_2 \cos(q_1 + q_2) \\
y &= l_1 \sin q_1 \ l_2 \sin(q_1 + q_2)
\end{aligned}$$

2.15 Modelo de Denavit-Hartenberg

En su libro Fundamentos de Robótica Antonio Barrientos explica el modelo Denavit-Hartenberg:

- 1 Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.
- 2 Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n.
- 3 Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
- 4 Para i de 0 a n-1 situar el eje z_i sobre el eje de la articulación i+ 1.
- 5 Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .
- 6 Para i de 1 a n-1, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación i+1.
- 7 Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
- 8 Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .
- 9 Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n , coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .
- 10 Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
- 11 Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.
- 12 Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.

- 13 Obtener α_i como el ángulo que habría que girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo S_{i-1} coincidiese totalmente con S_i .
 - 14 Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$.
 - 15 Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$
 - 16 La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.
- (Barrientos, 2007)

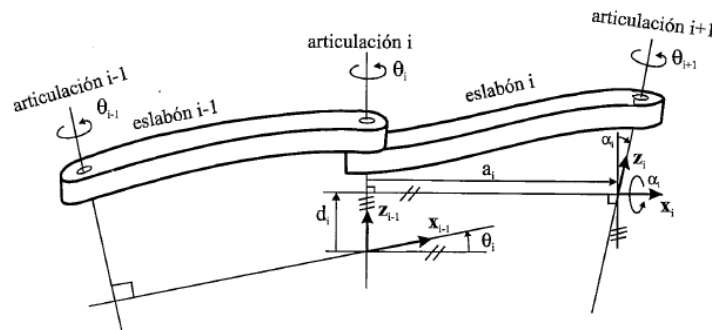


Figura 18. Parámetro D-H para un eslabón giratorio. Fuente: (Barrientos, 2007)

Los cuatro parámetros de D-H (θ_i , d_i , a_i , α_i) dependen únicamente de las características geométricas de cada enlace y de las conexiones que lo conectan con el enlace anterior y siguiente.

En concreto Antonio Barrientos los representa de la siguiente manera:

- θ_i : Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.
- d_i : Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas (i-1)ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.
- a_i : Es la distancia a lo largo del eje x que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x hasta el origen del sistema i-ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .
- α_i : Es el ángulo de separación del eje z_i y el eje z , medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

(Barrientos, 2007)

Una vez obtenidos los parámetros D-H, el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos del robot es inmediato, ya que vienen dadas por las matrices A, que se calculan según la expresión general. Las relaciones entre eslabones no consecutivos vienen dadas por las matrices T que, como ya se comentó anteriormente, se obtienen como producto de un conjunto de matrices A.

2.16 Matrices de rotación básicas

Es importante distinguir tres matrices de rotación que se consideran básicas. Lo anterior se debe a que dichas matrices son las que se obtienen cuando un sistema de coordenadas se rota con respecto a cualquiera de sus ejes principales, es decir, los ejes x, y, z . Para que se pueda simplificar la presentación de resultados se emplea la notación siguiente: si la rotación se hace con respecto al eje z un ángulo θ , se representará dicha matriz mediante $R_{z,\theta}$. De esta manera, las matrices de rotación básicas son:

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$
$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$
$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación poseen las siguientes propiedades importantes (se indica la propiedad para la rotación con respecto al eje x , pero lo mismo es válido para cualquier eje):

$$R_{x,\theta} = I$$
$$R_{x,\alpha} R_{x,\beta} = R_{x,\alpha+\beta}$$
$$[R_{x,\alpha}]^{-1} = R_{x,-\alpha}$$

2.17 Esfuerzos en vigas

Según (P. Beer, 2007) en su libro *Mecánica Vectorial para ingenieros* define:

“Vigas: las cuales usualmente son elementos prismáticos rectos y largos diseñados para soportar cargas aplicadas en varios puntos a lo largo del elemento.”

Si conocemos las tensiones y deformaciones, podemos analizar y diseñar las vigas para soportar diferentes condiciones de carga.

La carga aplicada a la viga hace que se doble, lo que hace que su eje se doble en una curva. Por ejemplo, la viga en voladizo AB soporta una carga P en su extremo libre (figura 19a). Inicialmente, el eje recto se dobla y adquiere una forma curva (figura 19b), llamada curva de deflexión del haz.

En su libro Mecánica de materiales, M.Gere señala que: “La deflexión de la viga en cualquier punto a lo largo de su eje es el desplazamiento de ese punto desde su posición original, medido en la dirección y . Denotamos la deflexión con la letra v para distinguirla de la coordenada y ”. (M. Gere, 2008)

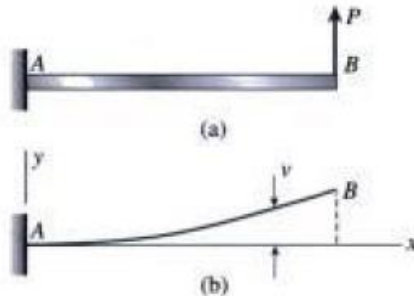


Figura 19. Deflexión en viga. (P. Beer, 2007)

2.18 Esfuerzos normales para vigas en flexión

Dentro de su libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Richard G. Budynas afirma que: “Las ecuaciones para representar los esfuerzos normales en flexión en vigas rectas se basan en los siguientes supuestos:

- La viga se somete a flexión pura; esto significa que la fuerza cortante es nula y que no hay cargas de torsión o axiales presentes.
 - El material es isotrópico y homogéneo.
 - El material cumple con la ley de Hooke.
 - Inicialmente la viga es recta, con una sección transversal constante en toda su longitud.
 - La viga tiene un eje de simetría en el plano de la flexión.
 - Las proporciones de la viga son tales que fallaría ante la flexión, en vez de fallar por aplastamiento, corrugación o pandeo lateral.
 - Las secciones transversales de la viga permanecen planas durante la flexión”.
- (G. Budynas, 2015)

2.19 Armaduras

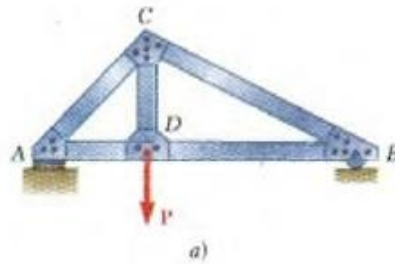


Figura 20. Representación de una armadura. (P. Beer, 2007)

Las vigas son uno de los principales tipos de estructuras utilizadas en ingeniería. Brindan una solución efectiva y económica donde las vigas están formadas por elementos rectos conectados mediante nudos. Los elementos de la armadura están conectados sólo en sus extremos; por lo tanto, ningún elemento se extiende más allá de los nodos. (P. Beer, 2007)

Cada armadura está diseñada para soportar cargas que actúan en su plano y por tanto puede considerarse una estructura bidimensional. Los elementos de viga suelen ser delgados y sólo pueden soportar pequeñas cargas laterales; por lo tanto, todas las cargas deben aplicarse a los nodos, no a los miembros. El peso de los miembros de la armadura lo soportan los nodos y la mitad del peso de cada miembro se aplica a cada nodo al que está conectado.

2.20 Análisis de armaduras mediante el método de nodos

Se puede considerar una armadura como un conjunto de pernos y elementos bajo la influencia de dos fuerzas. Por lo tanto, el autobús que se muestra en la Fig. 20, cuyo diagrama de cuerpo libre se muestra en la Fig. 21a, se puede desmontar y dibujar. tornillos y cada elemento (Fig. 21b).

Sobre cada elemento actúan dos fuerzas, una en cada extremo; estas fuerzas tienen la misma magnitud, la misma dirección de acción y direcciones opuestas. Además, la tercera ley de Newton establece que las fuerzas de acción y reacción entre el miembro y el tornillo son iguales y de dirección opuesta. Por lo tanto, la fuerza ejercida por un miembro sobre las dos partes de conexión a las que está conectado debe ser a lo largo del miembro y debe ser igual y de dirección opuesta.

Ferdinand P. Beer en su libro *Mecánica Vectorial para ingenieros* señala:

“Con I frecuencia se hace referencia a la magnitud común de las fuerzas ejercidas por un elemento sobre los dos pernos a los que se conecta como la fuerza en el elemento bajo consideración, a pesar de que esta cantidad en realidad es un escalar. Como las líneas de acción de todas las fuerzas internas en una armadura son conocidas, el análisis de una armadura se reduce a calcular las fuerzas en los elementos que la constituyen y a determinar si cada uno de dichos elementos está en tensión o en compresión.” (P. Beer, 2007)

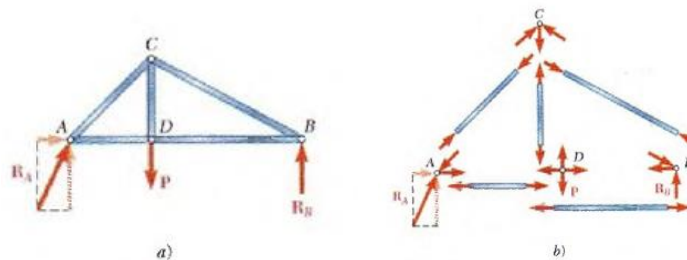


Figura 21. Representación de una armadura. (P. Beer, 2007)

Dado que toda la armadura está equilibrada, cada perno también debe estar equilibrado. Se puede demostrar si un tornillo está en equilibrio dibujando su diagrama de cuerpo libre y escribiendo dos ecuaciones de equilibrio.

Ferdinand Beer en su libro *Mecánica Vectorial para ingenieros* explica que: "Si una armadura tiene n pernos, habrá $2n$ ecuaciones disponibles, las cuales podrán resolverse para $2n$ incógnitas. En el caso de una armadura simple, se tiene que $m = 2n - 3$, esto es, $2n = m + 3$, y el número de incógnitas que se pueden determinar a partir de los diagramas de cuerpo libre de los pernos es $m + 3$. Esto significa que las fuerzas en todos los elementos, las dos componentes de la reacción R_A y la reacción R_B se determinan considerando los diagramas de cuerpo libre de los pernos." (P. Beer, 2007)

El hecho de que la armadura sea generalmente un cuerpo rígido en equilibrio se puede utilizar para escribir tres ecuaciones adicionales que involucran las fuerzas que se muestran en el diagrama de cuerpo libre de la figura 21a. Como estas ecuaciones no contienen información nueva, son independientes de las ecuaciones asociadas con el diagrama de caso sin tornillos. Sin embargo. Las tres ecuaciones analizadas se pueden utilizar para determinar los componentes de la reacción en los portadores. La disposición de pernos y elementos en una armadura simple permite encontrar siempre nodos que involucran solo dos fuerzas desconocidas. Estas fuerzas se determinan mediante métodos y sus valores se transfieren a los nodos vecinos, tratándolos como cantidades conocidas en dichos nodos. Este proceso se repite hasta que se hayan determinado todas las fuerzas desconocidas.

2.21 Fases e iteraciones del proceso de diseño

Todo el proceso de diseño de principio a fin suele mostrarse en la Figura 22, comenzando con la identificación de una necesidad y la decisión de satisfacerla, y después de varias iteraciones terminando con un plan que la satisfaga. Dependiendo de la naturaleza de la tarea de diseño, ciertos pasos se repiten a lo largo del ciclo de vida del producto, desde la idea hasta su finalización. (G. Budynas, 2015)

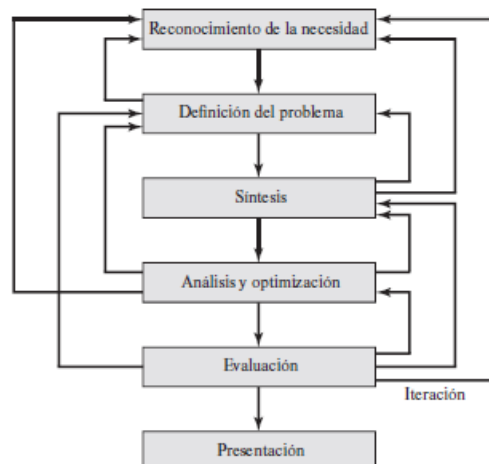


Figura 22. Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones. (G. Budynas, 2015)

Dentro de su libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Richard Budynas afirma: "El proceso de diseño comienza con la identificación de una necesidad. El reconocimiento y la expresión de esta constituyen un acto muy creativo, porque la necesidad quizá solo sea una vaga inconformidad, un sentimiento de inquietud o la sensación de que algo no está bien". (G. Budynas, 2015)

2.22 Consideraciones de diseño

A veces, la resistencia requerida de un elemento del sistema es un factor importante para determinar su geometría y tamaño. En este caso, la durabilidad se considera una consideración de diseño importante. En el diseño expresivo, las consideraciones están directamente relacionadas con la función que afecta el diseño de un elemento o de todo el sistema. Muchas de estas propiedades siempre deben considerarse en una situación de diseño determinada.

Entre las más importantes Richard Budynas dentro de su libro Diseño en ingeniería mecánica de Shigley menciona las siguientes propiedades:

1. Funcionalidad
 2. Resistencia/esfuerzo
 3. Distorsión/deflexión/rigidez
 4. Desgaste
 5. Corrosión
 6. Seguridad
 7. Confiabilidad
 8. Facilidad de manufactura
 9. Utilidad
 10. Costo
 11. Fricción
 12. Peso
 13. Vida
 14. Ruido
 15. Estilo
 16. Forma
 17. Tamaño
 18. Control
 19. Propiedades térmicas
 20. Superficie
 21. Lubricación
 22. Comercialización
 23. Mantenimiento
 24. Volumen
 25. Responsabilidad legal
 26. Capacidad de reciclado/recuperación de recursos
- (G. Budynas, 2015)

CAPÍTULO III DESARROLLO Y METODOLOGÍA

3.1 Iteraciones de diseño para el brazo manipulador

El diseño de este brazo manipulador consiste en la planificación, desarrollo y creación de un producto dirigido a la resolución de una necesidad previamente vista. Implica un análisis que permite comprender las verdaderas necesidades y cómo ayuda este producto a solucionar esos problemas establecidos. Este, permite tomar mejores decisiones gracias a una etapa de pruebas que muestra errores u oportunidades antes de llegar al producto final.

Para el brazo manipulador se hicieron tres versiones antes del ensamble final, cada una de ellas tiene sus características y con cada versión se fueron mejorando estos aspectos de acuerdo a la necesidad establecida para que así la función del brazo manipulador fuera lo más correcta posible.

3.2 Versión número 1 del brazo manipulador

En este ensamble se observa un diseño muy poco óptimo, la cámara al estar empotrada en la base general no tiene movilidad por si sola, es decir, que su movimiento depende del giro rotatorio del mecanismo completo, además de que su visión está situada muy por arriba de donde están las garras. Fácilmente que observa que este es un ensamble demasiado pesado, teniendo en cuenta que este debe de ir colocado en un dron, esto debido a que tiene el soporte derecho, izquierdo y su tapa trasera. Cuenta con 4 garras recolectoras las cuales no permiten la toma adecuada de los frutos. El diseño de los eslabones al ser como de escuadra imposibilita el movimiento en "Y" y en "Z" ya que choca con los soportes.

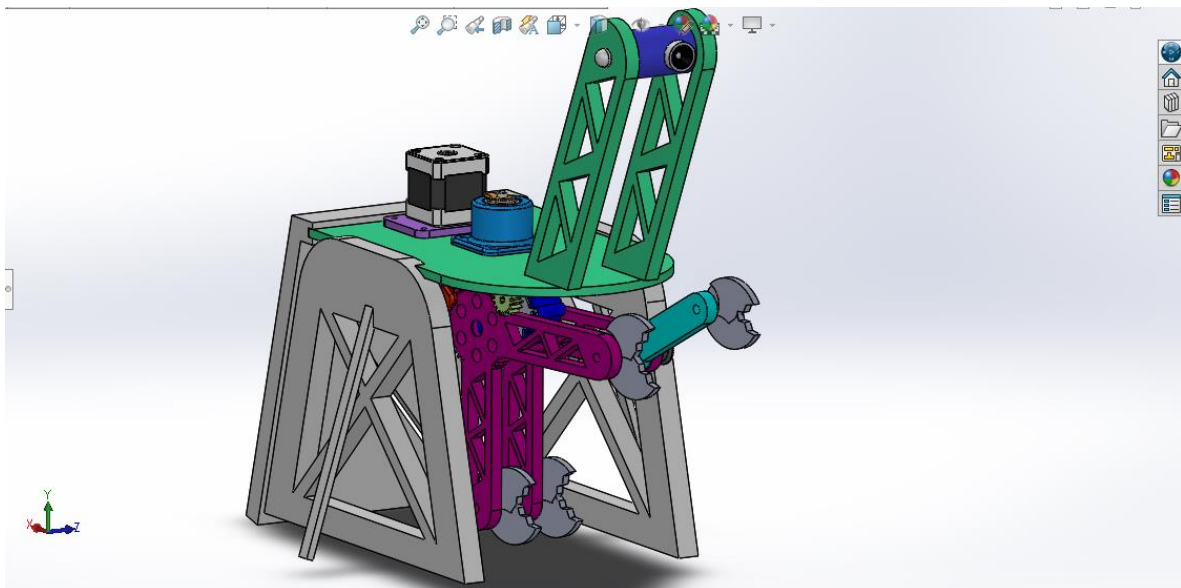


Figura 23. Ensamble de la versión número 1 en SolidWorks. Autor propio.

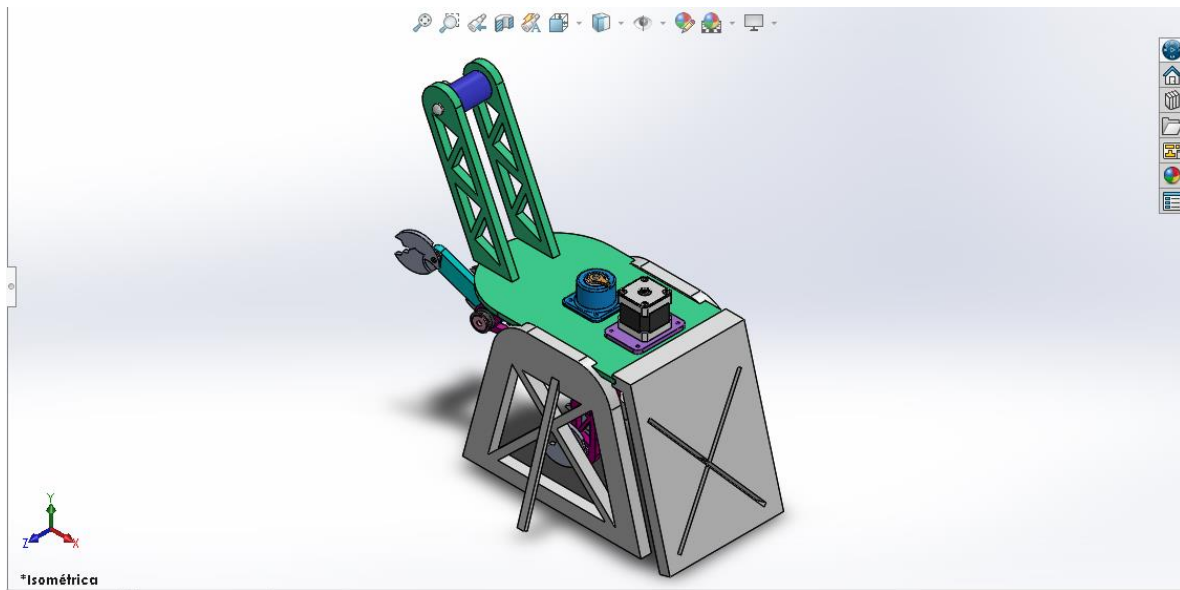


Figura 24. Ensamble de la versión número 1, vista isométrica en SolidWorks. Autor propio.

3.2.1 Comparación de las propiedades de diseño de la versión 1 del brazo manipulador

Ponderación establecida por el asesor de tesis.

Propiedad	Ponderación
Funcionalidad – 30%	5%
Peso – 30%	5%
Confiabilidad – 20%	5%
Forma – 10%	5%
Tamaño – 10%	5%

Tabla 1. Ponderación establecida por el asesor de tesis de la versión 1.

Ponderación establecida por el productor de café.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	10%
Peso – 30%	5%
Confiabilidad – 20%	10%
Forma – 10%	5%
Tamaño – 10%	5%

Tabla 2. Ponderación establecida por el productor de café de la versión 1.

Ponderación establecida por diseñadora.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	5%
Peso – 30%	5%
Confiabilidad – 20%	5%
Forma – 10%	5%
Tamaño – 10%	5%

Tabla 3. Ponderación establecida por diseñadora de la versión 1.

Se observa:

- Poca movilidad de la cámara ya que depende del giro rotatorio del mecanismo completo.
- Sus bases hacen que sea muy pesado y tenga mucha restricción en la movilidad de los brazos.
- Se añadieron varios brazos robóticos, pero al añadir más se restringía considerablemente la movilidad, por lo que es ineficiente.
- Las dimensiones no son correctas.

3.3 Versión número 2 del brazo manipulador

Se observa el cambio en la cámara, disminuyendo su altura lo que es más óptimo ya que su campo de visión está más cerca del manipulador. Dentro de esta versión se puede apreciar considerablemente que es menos pesado que la versión 1, ya que se cambiaron los soportes, además de que se quitó la tapa posterior. Se redujo a solo 2 eslabones la cual se potenció con dos bandas, sin embargo, la "basemotor" restringe el movimiento, aunque se redujo a 1 garra, esta, no sigue tomando el fruto de una manera adecuada.

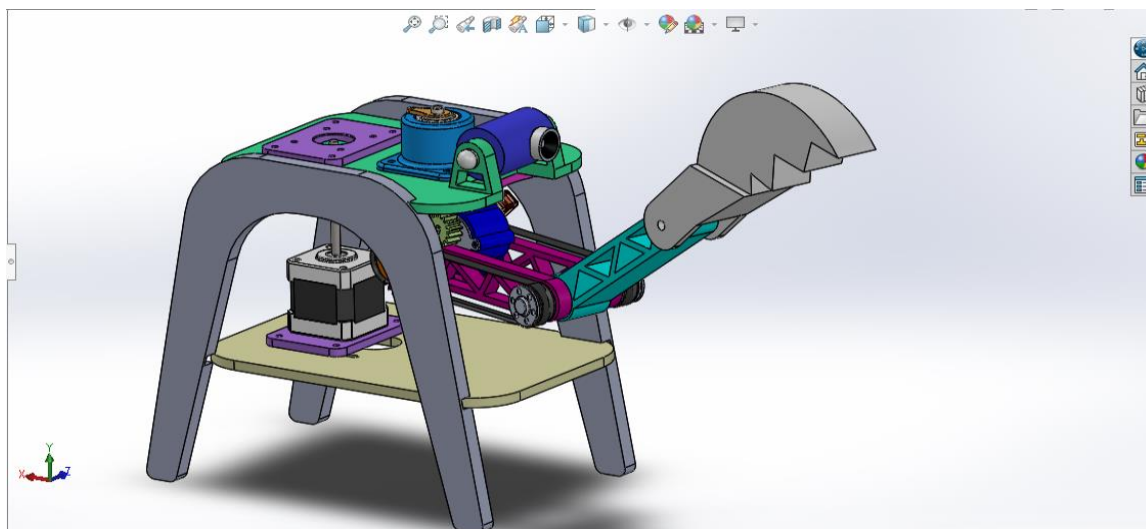


Figura 25. Ensamble de la versión número 2 en SolidWorks. Autor propio.

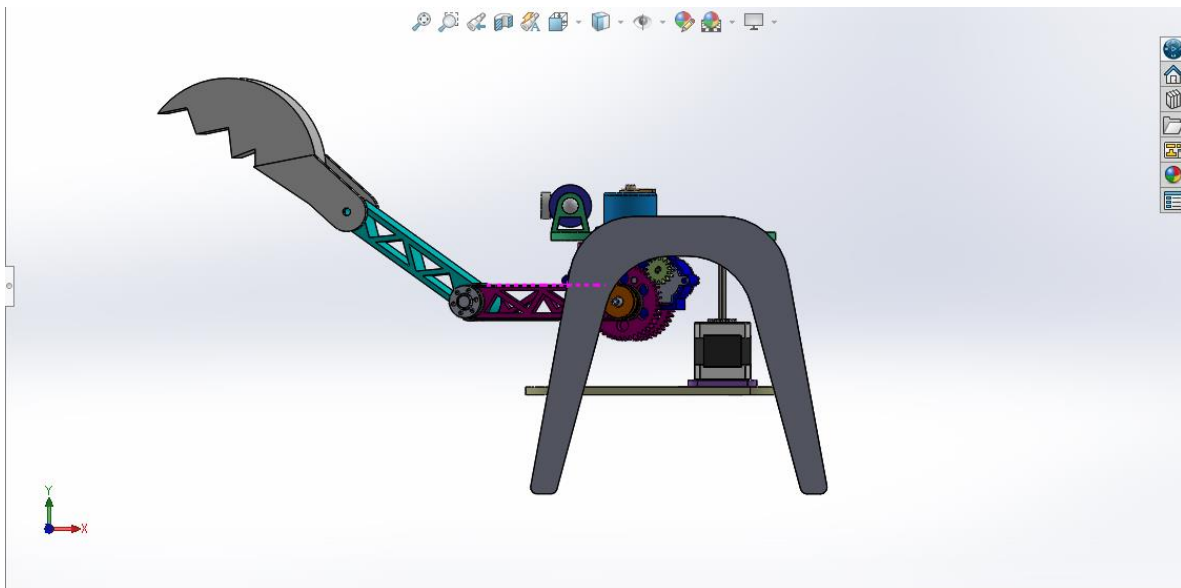


Figura 26 Ensamble de la versión número 2, vista en plano x-y en SolidWorks. Autor propio.

3.3.1 Comparación de las propiedades de diseño de la versión 1 del brazo manipulador

Ponderación establecida por el asesor de tesis.

Propiedad	Ponderación
Funcionalidad – 30%	5%
Peso – 30%	6%
Confiabilidad – 20%	5%
Forma – 10%	6%
Tamaño – 10%	6%

Tabla 4. Ponderación establecida por el asesor de tesis de la versión 2 del brazo manipulador.

Ponderación establecida por el productor de café.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	12%
Peso – 30%	10%
Confiabilidad – 20%	10%
Forma – 10%	5%
Tamaño – 10%	5%

Tabla 5. Ponderación establecida por el productor de café de la versión 2 del brazo manipulador.

Ponderación establecida por diseñadora.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	5%
Peso – 30%	5%
Confiabilidad – 20%	5%
Forma – 10%	6%
Tamaño – 10%	5%

Tabla 6. Ponderación establecida por diseñadora de la versión 2 del brazo manipulador.

Se observa:

- Se mejoró la parte de gestionar los brazos, reduciéndolo sólo a 3 eslabones.
- Se agregó doble potencia para el brazo añadiendo 2 bandas.
- La garra no sigue siendo eficiente para tomar el café de los árboles.
- La base inferior que sostiene los motores restringe la movilidad del brazo.
- La movilidad de la cámara se probó tenerla más abajo, pero sigue restringiendo al movimiento total del robot.
- El tamaño grande de la garra, las dos poleas y eslabones aumenta el peso de la garra.

3.4 Versión número 3 del brazo manipulador

En esta versión podemos apreciar que la cámara ya es incluida en el brazo. Pasa de 3 a 2 eslabones, al quitar la "basemotor" y al cambiar los soportes se reduce el peso aún más, aunado a esto permite más la movilidad del brazo de manera vertical y horizontal. La garra cambia en su diseño como una pinza la cual si permite el tomar los granos de café.

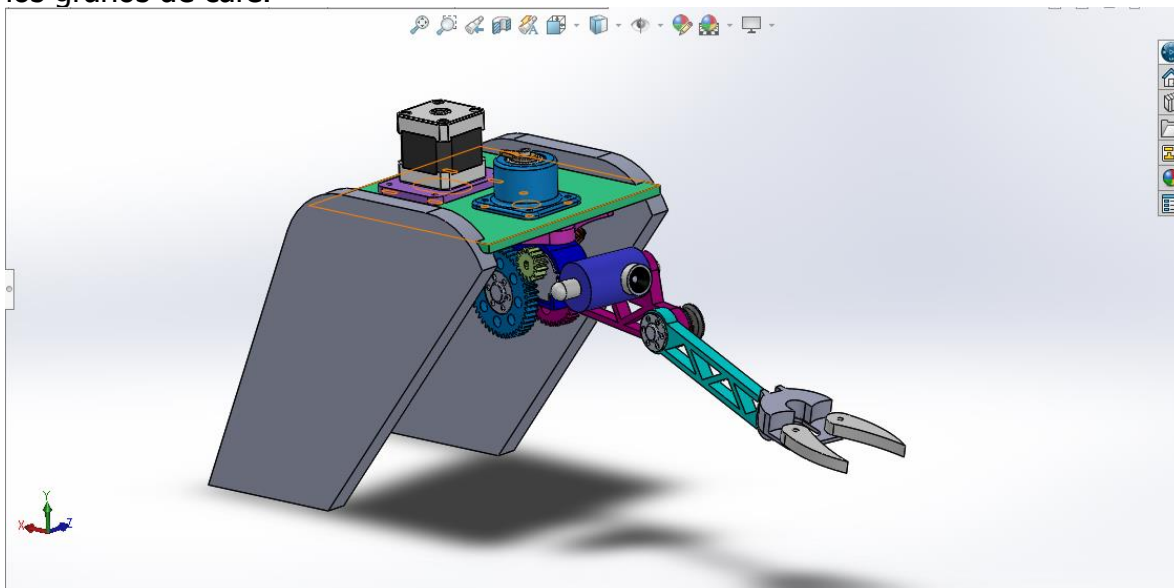


Figura 27. Ensamble de la versión número 3, vista en plano x-y en SolidWorks. Autor propio.

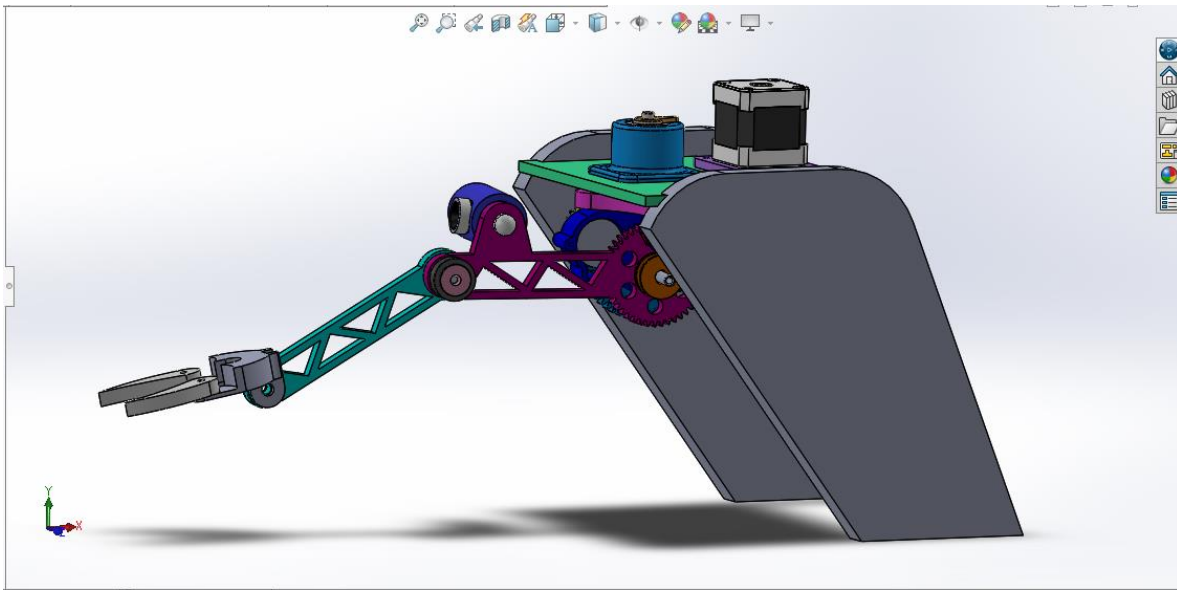


Figura 28. Ensamble de la versión número 3, vista lateralmente en SolidWorks. Autor propio.

3.4.1 Comparación de las propiedades de diseño de la versión 3 del brazo manipulador

Ponderación establecida por el asesor de tesis.

Propiedad	Ponderación
Funcionalidad – 30%	15%
Peso – 30%	15%
Confiabilidad – 20%	15%
Forma – 10%	7%
Tamaño – 10%	7%

Tabla 7. Ponderación establecida por el asesor de tesis para la versión 3 del brazo manipulador.

Ponderación establecida por el productor de café.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	20%
Peso – 30%	20%
Confiabilidad – 20%	15%
Forma – 10%	8%
Tamaño – 10%	8%

Tabla 8. Ponderación establecida por el productor de café de la versión 3 del brazo manipulador.

Ponderación establecida por diseñadora.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	15%
Peso – 30%	20%
Confiabilidad – 20%	15%
Forma – 10%	8%
Tamaño – 10%	7%

Tabla 9. Ponderación establecida por diseñadora de la versión 3 del brazo manipulador.

Se observa:

- Se eligió cambiar el diseño de las bases en el que se siga manteniendo el equilibrio pero que dé un poco más de libertad al robot.
- La pinza se rediseño para que tenga mejor agarre a los granos ya que el anterior no era eficiente.
- La movilidad de la cámara ya no está restringida con la estructura y se añadió al brazo para tener una visión simultánea a la vez con la movilidad del brazo.
- Se pasó de 3 eslabones a 2 en el manipulador, lo que reduce el peso.

3.5 Versión final del brazo manipulador

De acuerdo a las tres versiones anteriores y a las ponderaciones dadas en cada atributo se realizó un conjunto de todas las mejoras:

- Se tiene un movimiento de rotación en la pieza "EngraneEjeZ" de 180 grados de libertad de manera horizontal.
- Existen 2 eslabones que integran el brazo manipulador, el eslabón primero "Bombró2" tiene 90 grados de libertad de movimiento en "Y" y el eslabón "Brazo" tiene 180° de movimiento en "Y", este segundo es el que va a recibir la fuerza de los frutos.
- Se mejoró la base teniendo en cuenta el equilibrio y eficacia del robot, lo cual nos permitió que el brazo tuviera un más amplio movimiento.
- Para la ubicación de la cámara se crea su pase la cual esta ensamblada en la base general dejando totalmente libre al brazo manipulador.
- La garra se volvió a rediseñar y ahora es totalmente eficiente para tomar los granos de café.
- El peso del manipulador es menor que el establecido al principio, siendo un factor importante al tomar en cuenta que estará sujeto a un dron.
- En las piezas se buscaron compactarlas lo más reducido y compacto posible para que ninguna de ellas influya en el movimiento que el brazo recolector debe de hacer manteniendo la estabilidad.

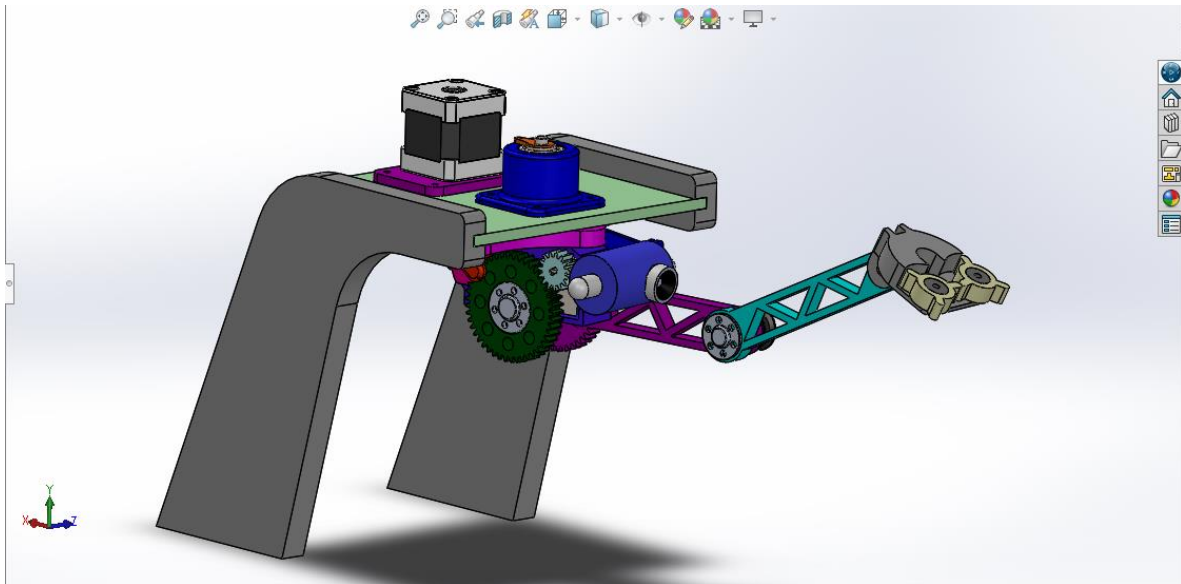


Ilustración 29. Ensamble de la versión final, en SolidWorks. Autor propio.

3.5.1 Comparación de las propiedades de diseño de la versión final del brazo manipulador

Ponderación establecida por el asesor de tesis.

Propiedad	Ponderación
Funcionalidad – 30%	25%
Peso – 30%	28%
Confiabilidad – 20%	17%
Forma – 10%	10%
Tamaño – 10%	10%

Tabla 10. Ponderación establecida por el asesor de tesis de la versión final del brazo manipulador.

Ponderación establecida por el productor de café.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	27%
Peso – 30%	30%
Confiabilidad – 20%	20%
Forma – 10%	10%
Tamaño – 10%	10%

Tabla 11. Ponderación establecida por el productor de café de la versión final del brazo manipulador.

Ponderación establecida por diseñadora.

Propiedad	Ponderación establecida
Funcionalidad – 30%	28%
Peso – 30%	28%
Confiabilidad – 20%	18%
Forma – 10%	10%
Tamaño – 10%	10%

Tabla 12. Ponderación establecida por diseñadora de la versión final del brazo manipulador.

El realizar las tablas de comparación ante cada versión presentada nos brindó la posibilidad de observar cada propiedad y cómo es que estas versiones del brazo recolector van cada vez siendo más factibles hasta llegar al prototipo final.

3.6 Cinemática directa del brazo manipulador

1. Primero se dibuja el los eslabones del sistema del mecanismo de la garra recolectora estableciendo los grados de libertad

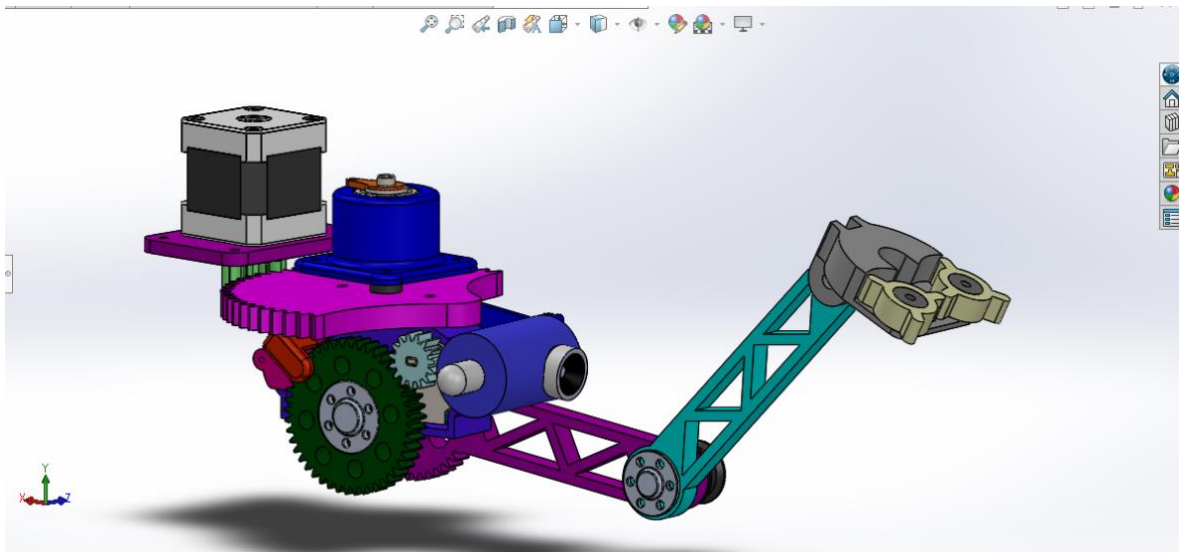


Figura 30. Ensamble del brazo manipulador en el software SolidWorks. Autor propio.

2. Enseguida se establecen los diagramas de cuerpo libre de este mecanismo, indicando cada x , y y z , su dirección y sus movimientos de rotación y de traslación.

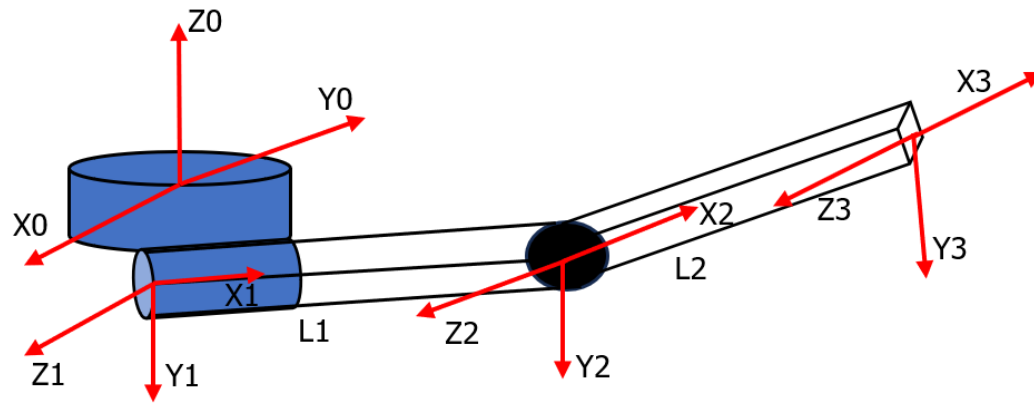
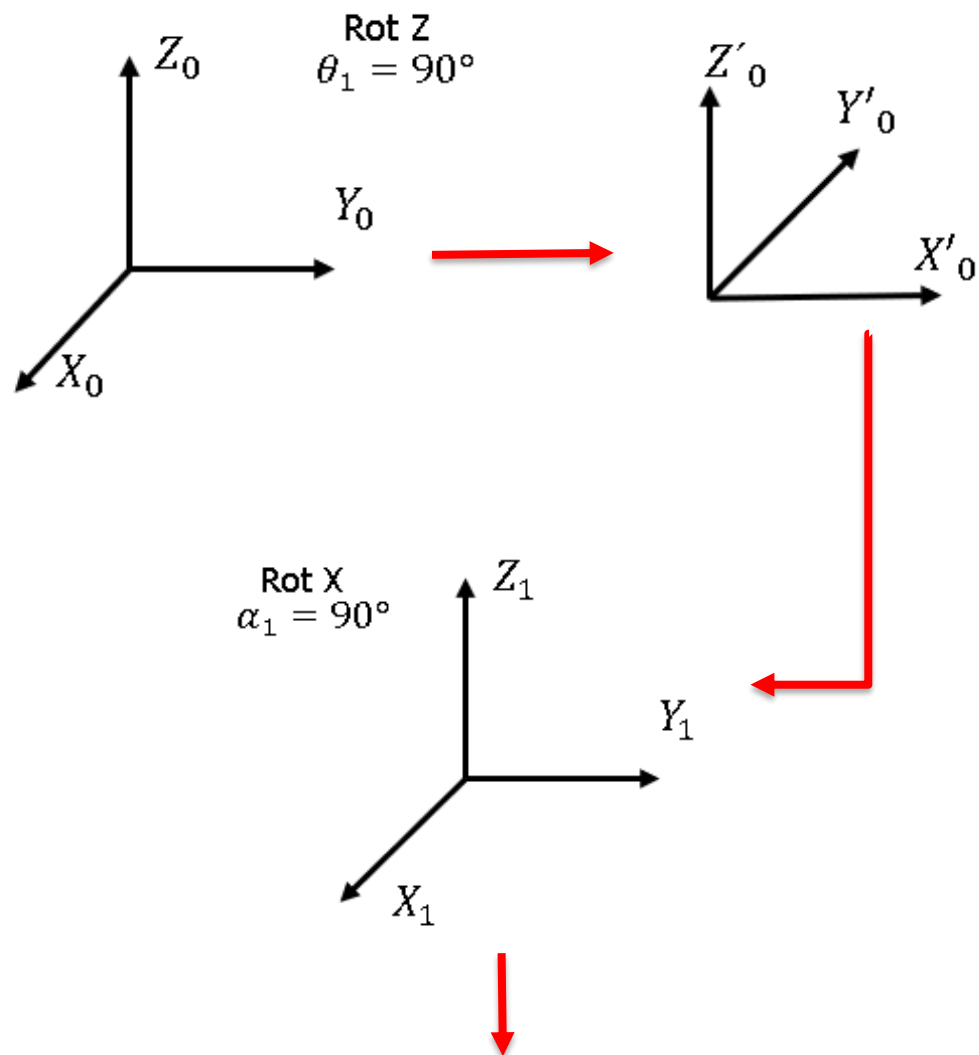
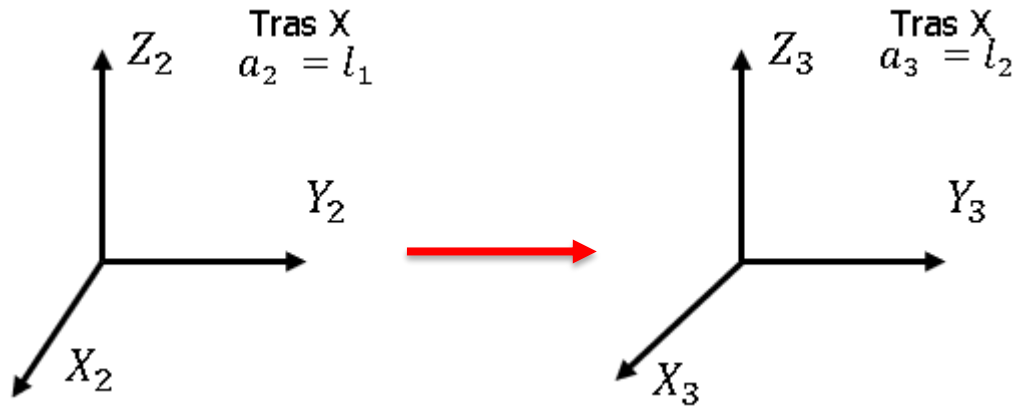


Figura 31. Diagrama de cuerpo libre. Autor propio.





3. Una vez teniendo los diagramas de cuerpo libre y obteniendo los datos anteriores se obtienen los parámetros de Denavit-Hartenberg para este robot manipulador de 3GDL obteniendo los valores de cada articulación de 0A_1 , 1A_2 , 2A_3 .

Articulación	θ	d	a	α
1	90°	0	0	90°
2	0	0	l_1	0
3	0	0	l_2	0

Tabla 13. Parámetros D-H para este robot manipulador de 3GDL.

$$T = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3$$

4. Ya establecidos los parámetros D-H se realizan las multiplicaciones, teniendo en cuenta las matrices de rotación como se muestra a continuación:

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_1 = A_{RZ0} * A_{X0}$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos_{90} & -\sin_{90} & 0 \\ \sin_{90} & \cos_{90} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos_{90} & -\sin_{90} \\ 0 & \sin_{90} & \cos_{90} \end{bmatrix}$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0+0+0 & 0+0+0 & 0+1+0 \\ 1+0+0 & 0+0+0 & 0+0+0 \\ 0+0+0 & 0+0+1 & 1+0+0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Para poder multiplicar esta matriz de rotación por una de traslación se le debe de aumentar una fila más para que así quede una matriz de 4x4, quedando de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ahora realizamos la multiplicación de las traslaciones en x:

$${}^1A_2 = A_{TX1}(l_1)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & c_{90} & -s_{90} & 0 \\ 0 & s_{90} & c_{90} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_1 * {}^1A_2 =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & c_{90} & -s_{90} & 0 \\ 0 & s_{90} & c_{90} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_2 =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Y por último el resultado de 0A_2 se multiplica por 2A_3 .

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & c_{90} & -s_{90} & 0 \\ 0 & s_{90} & c_{90} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.7 Cálculo de armadura de la viga 2

Primero se resuelve la viga 2 que es en donde se aplica la carga del fruto, en un programa que calcula las estructuras isostáticas: https://valdivia.staff.jade-hs.de/starrkoerper_es.html, introduciendo los valores de distancia, de carga y los apoyos que este eslabón tiene, como se puede ver a continuación.

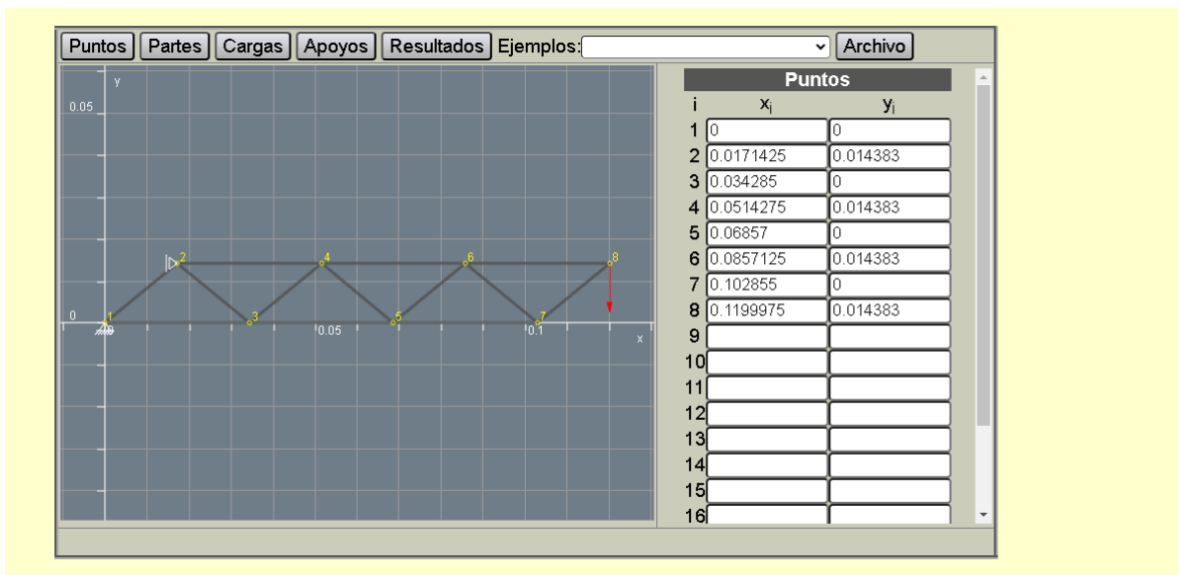


Figura 32. Creación de la Viga 2, teniendo las medidas en metros de x y y para los nodos. Autor propio.

En la fase inicial de la creación del modelo del brazo manipulador en SolidWorks, se inicia estableciendo los puntos en coordenadas "X" y "Y", que actuarán como nodos fundamentales en la armadura del eslabón. Estos nodos, definidos en el software con medidas en milímetros, son esenciales para la configuración geométrica inicial y la posterior construcción del eslabón.

Dentro del entorno de diseño en SolidWorks, las medidas del eslabón se manejan en milímetros para asegurar precisión y detalle en el modelado. Sin embargo, para llevar a cabo las operaciones y cálculos necesarios, es imperativo realizar conversiones a unidades más prácticas, en este caso, metros. Esto garantiza la coherencia en las dimensiones y facilita la aplicación de principios cinemáticos y dinámicos durante el análisis.

El eslabón en cuestión tiene un largo total de 120 milímetros y una altura de 14.383 milímetros. Estas dimensiones sirven como punto de partida para la generación de la estructura del brazo manipulador. A medida que se avanza en la construcción del modelo, se realizan divisiones y conversiones necesarias para ajustarse a las exigencias del sistema y facilitar los cálculos siguientes. Durante este proceso, se identifican y crean un total de 8 nodos, cada uno con su respectiva posición en el espacio tridimensional. Estos nodos actúan como puntos de conexión clave en la armadura del eslabón, estableciendo la estructura básica que permitirá el movimiento y la flexibilidad necesarios para la recolección de granos de café. Este enfoque detallado en la definición y conversión de las dimensiones, así como en la creación de nodos específicos, es esencial para la precisión y la robustez del modelo. Al ajustar las medidas a unidades coherentes y establecer nodos estratégicos, se sientan las bases para un análisis cinemático preciso y una posterior optimización del diseño del brazo manipulador para la cosecha de granos de café.

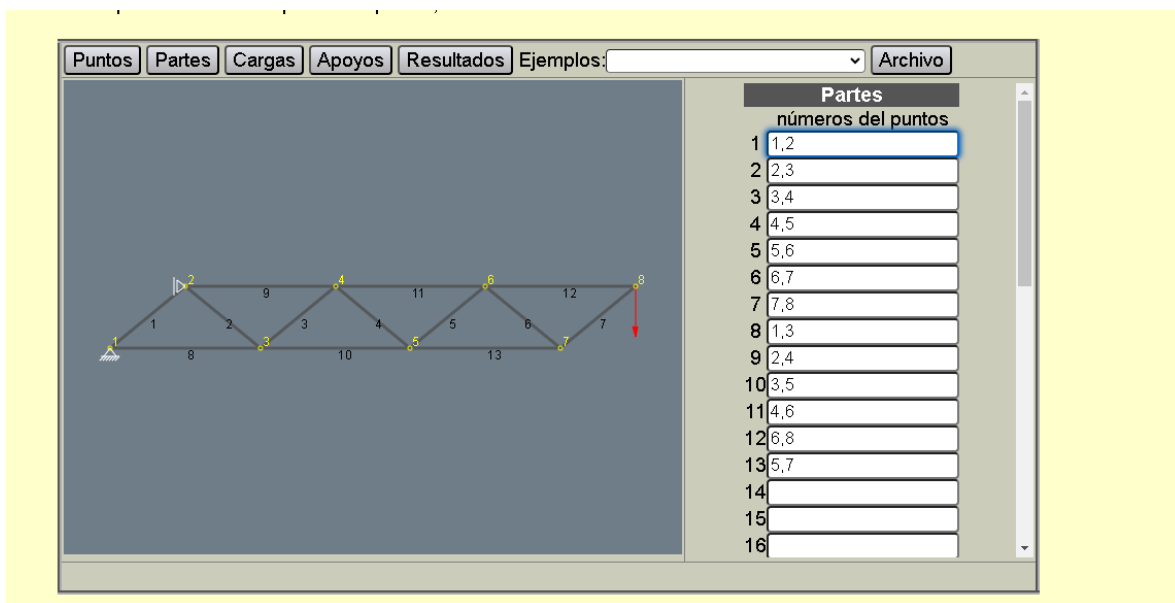


Figura 33. Coordenadas de los eslabones que forman la viga 2. Autor propio.

Una vez teniendo los nodos se crean los eslabones, uniendo cada nodo separado por una coma, teniendo en total 13 eslabones dentro de la armadura.

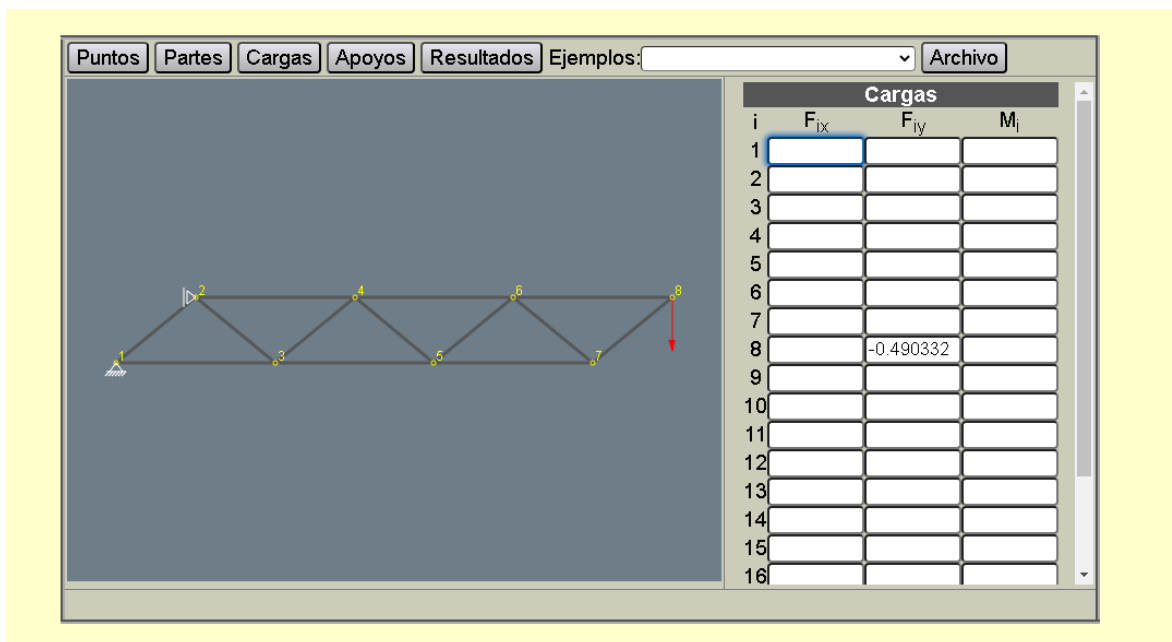


Figura 34. Asignación de la carga en el nodo 8, usando newton*mm como unidad de medida para la viga 2. Autor propio.

Asimismo, se aplica una carga, el ramo de frutos de café pesa alrededor de 30gr por lo que se coloca una carga de 50gr, que convertidos a newtons y en dirección contraria son -0.490332 aplicado en el nodo 8.

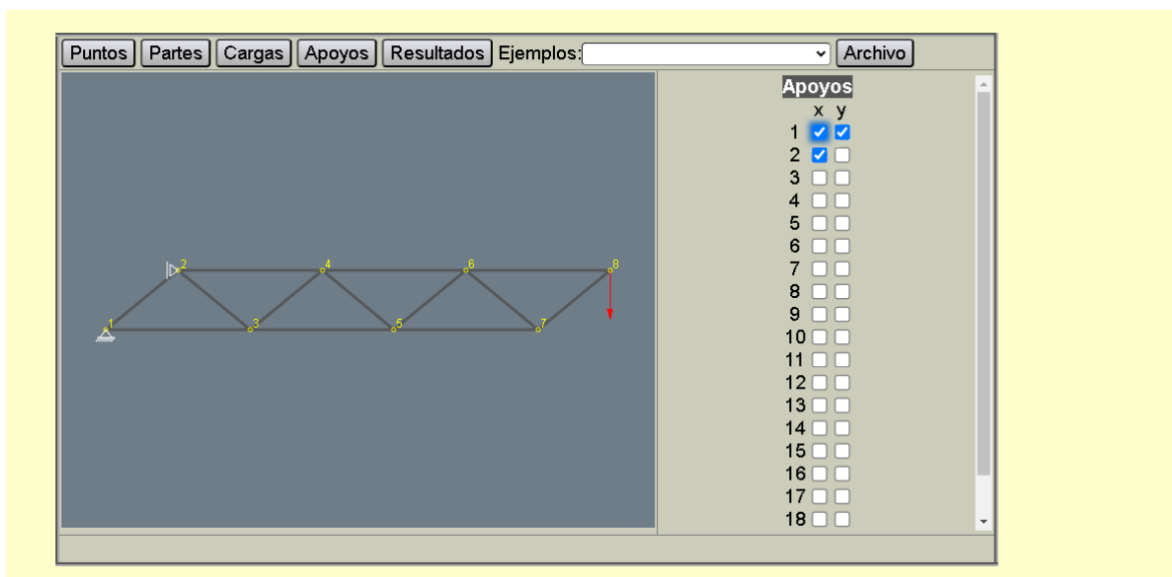


Figura 35. Apoyos situados en los nodos 1(apoyo fijo) y 2(apoyo móvil) para la viga 2. Autor propio.

En el contexto del diseño del brazo manipulador para la recolección de granos de café, se destaca la importancia de las sujeciones en los nodos 1 y 2 del brazo. Estas

sujeciones desempeñan un papel fundamental al simular el movimiento que ejecutará el brazo recolector durante la operación.

En el nodo 1, se implementa una sujeción fija que actúa como un punto de anclaje estable para el brazo manipulador. Esta sujeción fija garantiza la estabilidad y el soporte estructural necesario para el brazo durante su funcionamiento. La rigidez en este punto es fundamental para minimizar las deformaciones no deseadas y garantizar la precisión en la recolección de los granos. Además, esta sujeción fija establece la base para el movimiento controlado del brazo, permitiendo que el nodo 2, el punto de sujeción movable, realice los movimientos necesarios para la recolección eficiente.

En el nodo 2, la sujeción movable representa la articulación que simula el movimiento dinámico del brazo recolector. Esta sujeción es esencial para recrear la versatilidad y la adaptabilidad requeridas durante la cosecha de granos de café. La movilidad en este punto permite que el brazo manipulador se ajuste a la topografía del terreno y se adapte a las variaciones en la distribución de los granos, optimizando así el proceso de recolección.

La interacción entre estas sujeciones en los nodos 1 y 2 es clave para el correcto funcionamiento del brazo manipulador. La sujeción fija proporciona la estabilidad estructural necesaria, mientras que la sujeción movable introduce la flexibilidad esencial para alcanzar y recolectar los granos de café de manera eficaz.

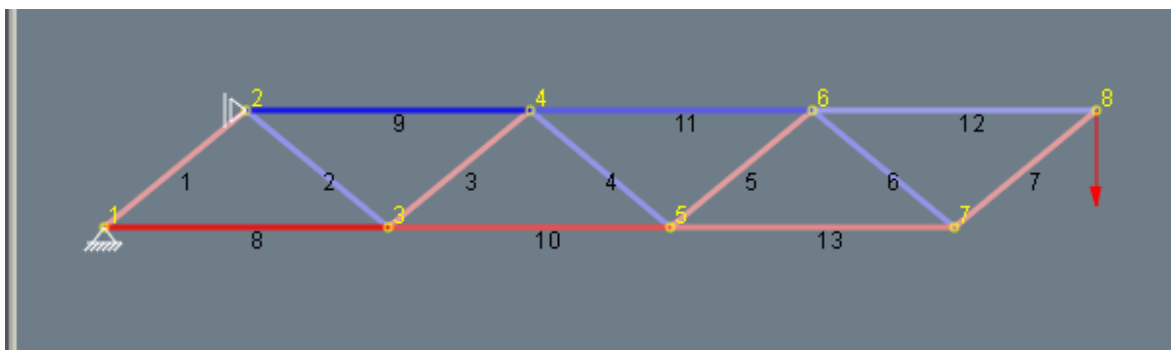


Figura 36. Resultado de la viga 2. Los elementos de color azul a tensión y los rojos a compresión. Autor propio.

En la evaluación de los resultados obtenidos para la viga del brazo manipulador, se ha observado que la coloración diferencial de los eslabones proporciona información crucial sobre las fuerzas internas que experimenta cada uno de ellos. En particular, se ha identificado que los eslabones coloreados en rojo están sometidos a fuerzas de compresión, mientras que aquellos en azul experimentan fuerzas de tensión.

Es notable destacar que esta diferenciación de colores no solo añade claridad visual al modelo, sino que también ofrece una comprensión instantánea de las condiciones de carga y los tipos de esfuerzos a los que están sometidos los diversos elementos de la viga.

En análisis más detallados, se ha identificado que el eslabón con mayor compresión

es el número 8. Este eslabón se extiende desde el nodo 1 hasta el nodo 3, encontrándose en las proximidades de la sujeción fija. Este hallazgo es significativo, ya que indica que la sección del brazo manipulador que abarca el eslabón 8 es crítica en términos de resistencia estructural, y se encuentra bajo cargas de compresión notables. Este conocimiento puede ser valioso para futuras iteraciones de diseño, donde se podrían considerar mejoras específicas en este segmento para aumentar su capacidad de carga y resistencia a la compresión.

En contraste, el eslabón con mayor tensión es el número 9. Este eslabón conecta el nodo 2 con el nodo 4, situándose en la proximidad de la sujeción movable. La identificación de este eslabón como el más tensionado es esencial, ya que indica áreas específicas del brazo manipulador que están sometidas a fuerzas de tensión máxima. Considerar este punto es crucial para garantizar que los materiales y las conexiones en esta región estén diseñados para soportar estas tensiones sin comprometer la integridad del sistema.

En conjunto, la identificación de eslabones en compresión y tensión, así como la identificación de los eslabones específicos más afectados, proporciona información valiosa para la optimización del diseño y la toma de decisiones en futuras fases del proyecto. Este análisis detallado contribuye a la comprensión global de las fuerzas internas que actúan sobre el brazo manipulador y orienta hacia posibles mejoras estructurales.

2.1.1 Resolución analítica de la viga 2 por el método de nodos



$$\sum F_y = 0$$

$$Ray - 50 = 0$$

$$Ray = 50gr$$

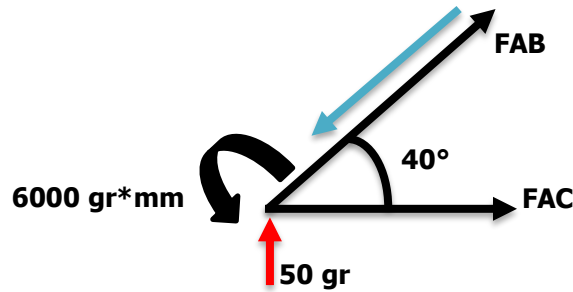
$$\sum M_a = 0$$

$$M_a - 50(120mm) = 6000gr/mm \text{ o } 0.490332N$$

$$M_a = 6000 \text{ gr/mm o } 58.8399 \text{ N/mm}$$

Nodo A

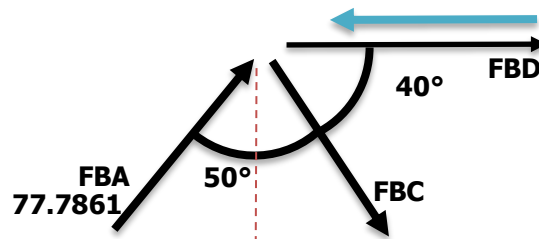
Para las operaciones se toma la carga son en gr y la distancia en mm, para así solamente en los resultados hacer las conversiones.



$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ FAB \cos_{40} + FAC &= 0 \\ FAC &= -FAB \cos_{40} \\ FAC &= 59.58760 \text{ gr} * \text{mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ 50 + FAB \sin_{40} &= 0 \\ FAB &= \frac{-50}{\sin_{40}} \\ FAB &= -77.7861 \text{ gr} * \text{mm}\end{aligned}$$

Nodo B



$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ 77.7861 \cos_{50} - FBC \cos_{50} &= 0 \\ 49.9999 - FBC \cos_{50} &= 0 \\ -FBC &= \frac{-49.9999}{\cos_{50}} = -77.7860 \\ FBC &= 77.7860 \text{ gr} * \text{mm}\end{aligned}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$77.7861 \operatorname{sen}_{50} + FBD + FBC \operatorname{sen}_{50} = 0$$

$$59.5876 + FBD + FBC \operatorname{sen}_{50} = 0$$

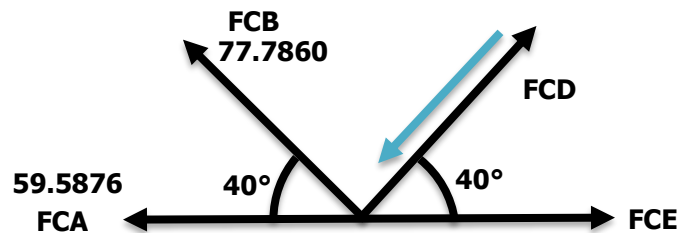
$$FBD = -FBC \operatorname{sen}_{50} - 59.5876$$

$$FBD = -77.7861 \operatorname{sen}_{50} - 59.5876$$

$$FBD = -59.5875 - 59.5876$$

$$FBD = -119.1751 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo C



$$\sum F_y = 0$$

$$77.786 \operatorname{sen}_{40} + FCD \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$49.9999 + FCD \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$FCD = \frac{-49.9999}{\operatorname{sen}_{40}} = -77.7860$$

$$FCD = -77.7860 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$-59.5876 + FCE - 77.7860 \cos_{40} + FCD \cos_{40} = 0$$

$$-59.5876 + FCE - 59.5875 + FCD \cos_{40} = 0$$

$$-119.1751 + FCE + FCD \cos_{40} = 0$$

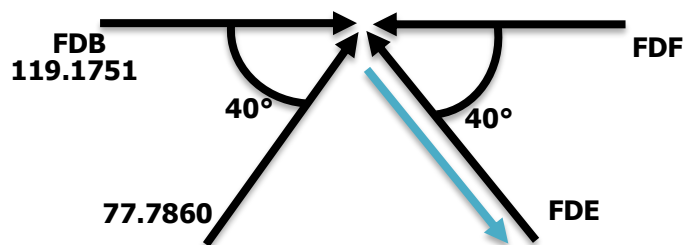
$$FCE = 119.1751 - FCD \cos_{40}$$

$$FCE = 119.1751 + 77.7860 \cos_{40}$$

$$FCE = 119.1751 + 59.5875$$

$$FCE = 178.7626 \text{ gr} * \text{mm}$$

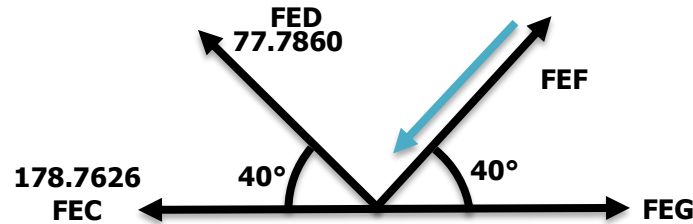
Nodo D



$$\begin{aligned}
 \text{FDC} \quad \sum F_y &= 0 \\
 77.786 \operatorname{sen}_{40} + FDE \operatorname{sen}_{40} &= 0 \\
 49.9999 + FDE \operatorname{sen}_{40} &= 0 \\
 FDE &= \frac{-49.9999}{\operatorname{sen}_{40}} = -77.7860 \\
 FDE &= -77.7860 \text{ gr} * \text{mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum F_x &= 0 \\
 119.1751 - FDF + 77.7860 \cos_{40} - FDE \cos_{40} &= 0 \\
 119.1751 - FDF + 59.5875 - FDE \cos_{40} &= 0 \\
 178.7626 - FDF - FDE \cos_{40} &= 0 \\
 -FDF &= 178.7626 + FDE \cos_{40} \\
 -FDF &= 178.7626 - 77.7860 \cos_{40} \\
 -FDF &= 178.7626 + 59.5875 \\
 -FDF &= -119.1751 \\
 FDF &= 119.1751 \text{ gr} * \text{mm}
 \end{aligned}$$

Nodo E



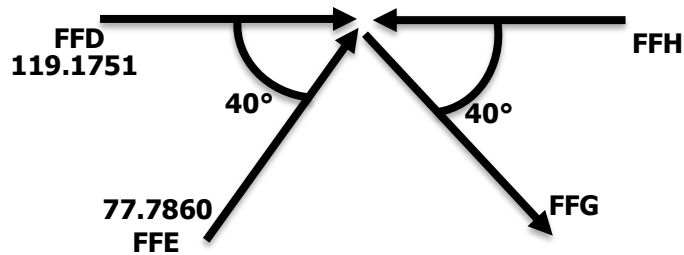
$$\begin{aligned}
 \sum F_y &= 0 \\
 77.786 \operatorname{sen}_{40} + FEF \operatorname{sen}_{40} &= 0 \\
 49.9999 + FEF \operatorname{sen}_{40} &= 0 \\
 FEF &= \frac{-49.9999}{\operatorname{sen}_{40}} = -77.7860 \\
 FEF &= -77.7860 \text{ gr} * \text{mm} \\
 \sum F_x &= 0 \\
 -178.7626 + FEG - 77.7860 \cos_{40} + FEF \cos_{40} &= 0 \\
 -178.7626 + FEG - 59.5875 + FEF \cos_{40} &= 0 \\
 -238.3501 + FEG + FEF \cos_{40} &= 0 \\
 FEG &= 238.3501 - FEF \cos_{40} \\
 FEG &= 238.3501 - (-77.7855 \cos_{40})
 \end{aligned}$$

$$FEG = 238.3501 + 77.7855 \cos 40^\circ$$

$$FEG = 238.3501 + 59.5871$$

$$FEG = 297.9372 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo F



$$\sum F_y = 0$$

$$77.7855 \sin 40^\circ - FFG \sin 40^\circ = 0$$

$$49.9995 - FFG \sin 40^\circ = 0$$

$$-FFG = \frac{-49.9995}{\sin 40^\circ} = -77.7854$$

$$-FFG = -77.7854 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$119.1751 + 77.7855 \cos 40^\circ - FFH - FFG \cos 40^\circ = 0$$

$$119.1751 + 59.5871 - FFH - FFG \cos 40^\circ = 0$$

$$178.7622 - FFH - FFG \cos 40^\circ = 0$$

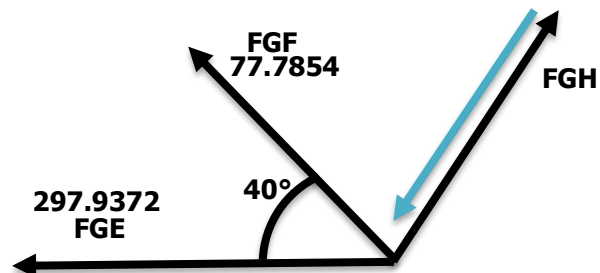
$$178.7622 - FFH - 77.7854 \cos 40^\circ = 0$$

$$178.7622 - FFH - 59.5870$$

$$-FFH = -119.1752$$

$$FFH = 119.1752 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo G



$$\sum F_y = 0$$

$$77.7854 \operatorname{sen}_{40} + FGH \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$49.9994 + FGH \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$FGH = \frac{-49.9994}{\operatorname{sen}_{40}} = -77.7852$$

$$FGH = -77.7852 \text{ gr} * \text{mm}$$

3.8 Cálculo de armaduras en viga 1

En el proceso de resolución de la viga 1, se ha observado que las dimensiones de esta estructura son idénticas a las de la viga 2. Esta similitud en las medidas implica que los resultados de los cálculos realizados para la viga 2 son aplicables directamente a la viga 1. Esta equivalencia facilita significativamente la evaluación y el análisis de la carga en la viga 1, ya que los resultados obtenidos previamente pueden ser utilizados de manera directa.

La decisión de colocar una carga de 50gr, y la justificación de que esta carga se transmite de manera similar en ambas vigas, permite consolidar los cálculos obtenidos en la viga 2 para ser aplicados a la viga 1. Este enfoque ahorra tiempo y recursos, ya que se evita realizar cálculos redundantes para estructuras que comparten características geométricas idénticas.

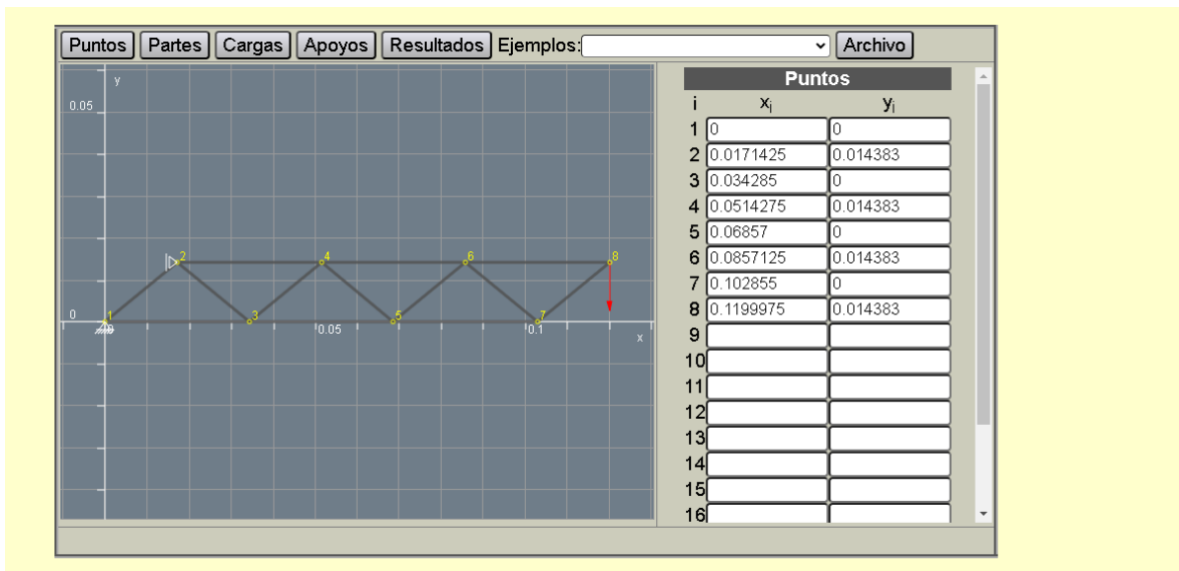


Figura 37. Creación de la Viga 1, teniendo las medidas en metros de x y y para los nodos. Autor propio.

La carga de 50 gramos, al ser transmitida de manera similar en ambas vigas, genera resultados de cálculo consistentes entre las dos estructuras. Esto sugiere una eficiente transferencia de cargas en el sistema y respalda la validez de los resultados

obtenidos.

Además de simplificar el proceso de cálculos, esta similitud en las dimensiones y cargas entre las vigas 1 y 2 permite una mayor coherencia en el análisis global del brazo manipulador.

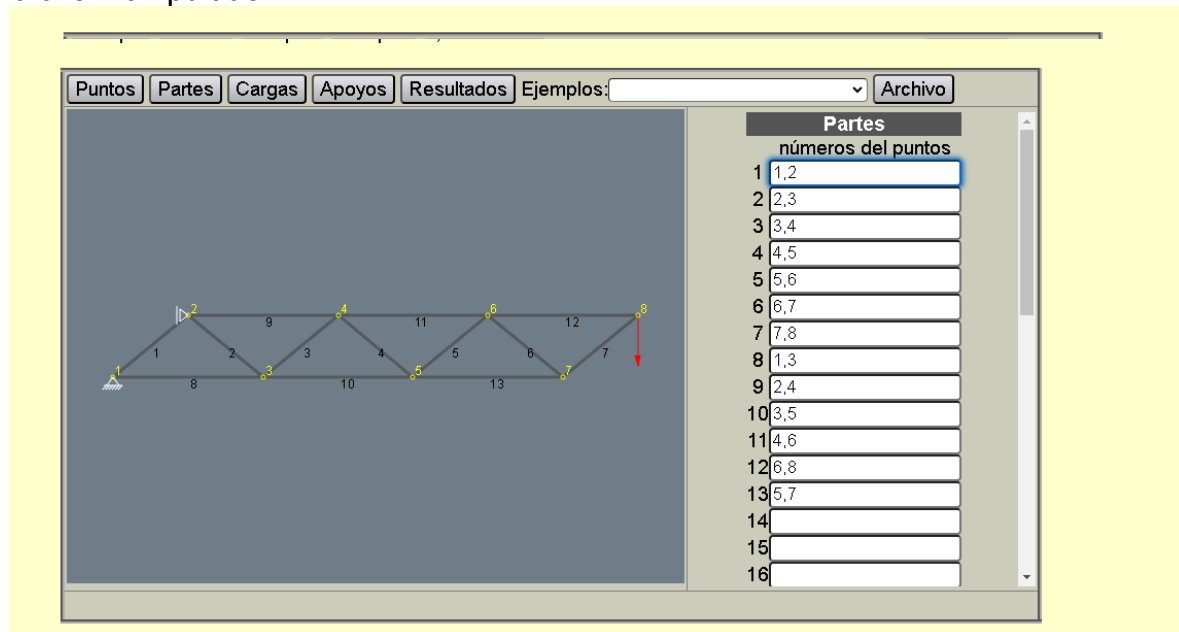


Figura 38. Coordenadas de los eslabones que forman la viga 1 y asignación de la carga en el nodo 8, usando newton*mm como unidad de medida. Autor propio.

Al estandarizar ciertos aspectos del diseño, se facilita la comprensión de las fuerzas y tensiones en diferentes secciones de la estructura, contribuyendo a una evaluación más integral del rendimiento del brazo manipulador bajo diversas condiciones de carga. En resumen, la decisión de asumir la igualdad en dimensiones y cargar de manera consistente ambas vigas simplifica el análisis estructural y proporciona resultados aplicables y coherentes para la totalidad del sistema

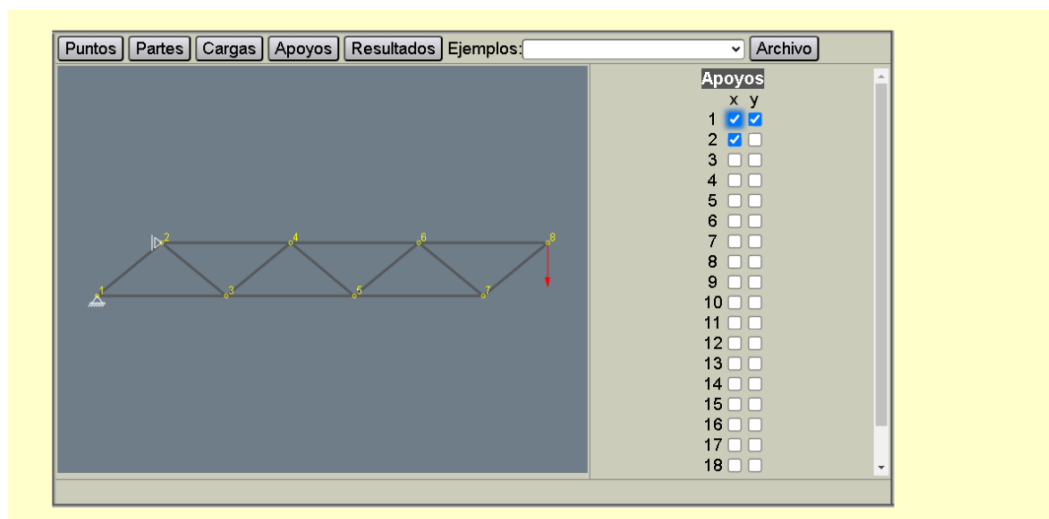


Figura 39. Apoyos situados en los nodos 1(apoyo fijo) y 2(apoyo móvil) para la viga 1. Autor propio.

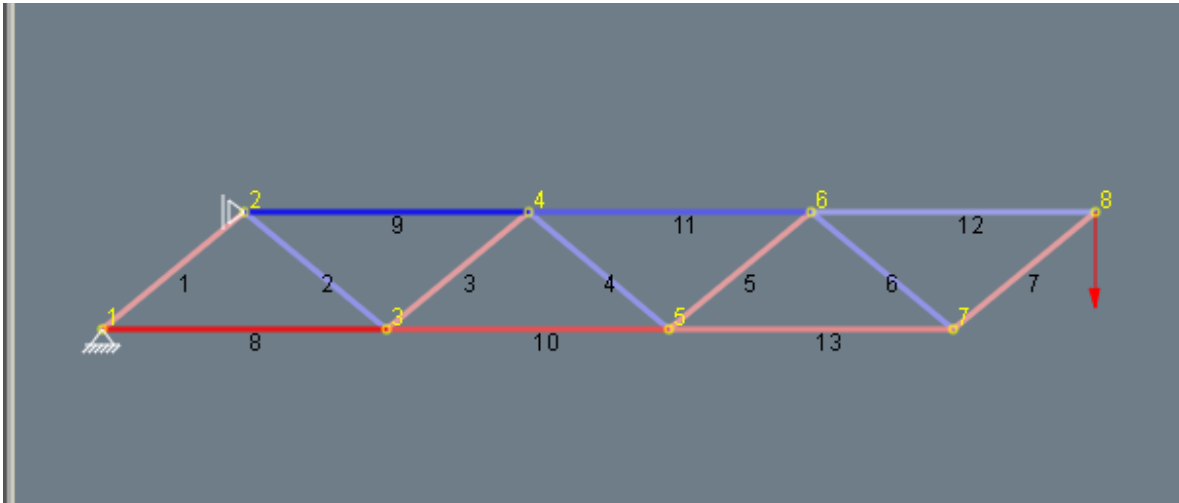


Figura 40. Resultado de la viga 2. Autor propio.

La replicación de la disposición estructural en la viga 1, siguiendo el mismo patrón que se observó en la viga 2, confirma la consistencia en el diseño y la distribución de las sujeciones en el brazo manipulador. Al igual que en la viga 2, en la viga 1 se evidencian las dos sujeciones clave: la sujeción fija en el nodo 1 y la sujeción movable en el nodo 2. La presencia de esta sujeción fija en el nodo 1 también tiene un impacto directo en el eslabón 8, generando la mayor compresión en este segmento del brazo manipulador. Además, en el eslabón 9 se presenta la mayor tensión. En resumen, la similitud entre las vigas 1 y 2 en términos de diseño estructural y la distribución de sujeciones refuerza la consistencia del modelo.

3.8.1 Resolución analítica de la viga 1 por el método de nodos



$$\begin{aligned}\sum F_y &= 0 \\ R_{ay} - 50 &= 0 \\ R_{ay} &= 50gr\end{aligned}$$

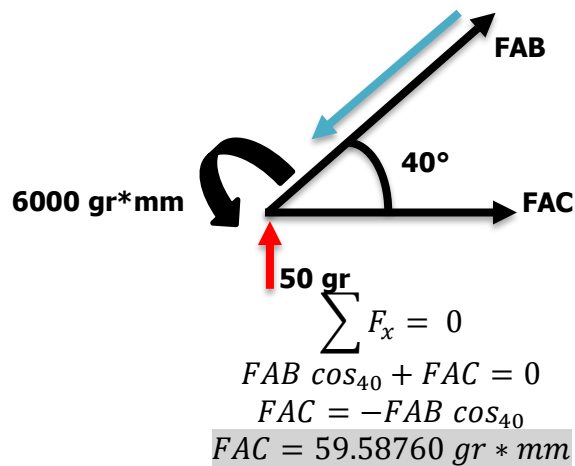
$$\sum M_a = 0$$

$$M_a - 50(120\text{mm}) = 6000\text{gr/mm} \cdot 0.490332\text{N}$$

$$M_a = 6000\text{ gr/mm o } 58.8399\text{ N/mm}$$

Nodo A

Como en la viga 2, se toma la carga son en gr y la distancia en mm, para así solamente en los resultados hacer las conversiones.



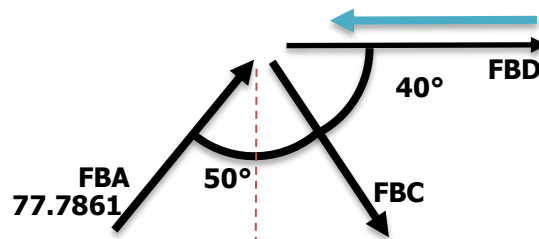
$$\sum F_y = 0$$

$$50 + F_{AB} \sin_{40} = 0$$

$$F_{AB} = \frac{-50}{\sin_{40}}$$

$$F_{AB} = -77.7861\text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo B



$$\sum F_y = 0$$

$$77.7861 \cos_{50} - FBC \cos_{50} = 0$$

$$49.9999 - FBC \cos_{50} = 0$$

$$-FBC = \frac{-49.9999}{\cos_{50}} = -77.7860$$

$$FBC = 77.7860 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$77.7861 \sin_{50} + FBD + FBC \sin_{50} = 0$$

$$59.5876 + FBD + FBC \sin_{50} = 0$$

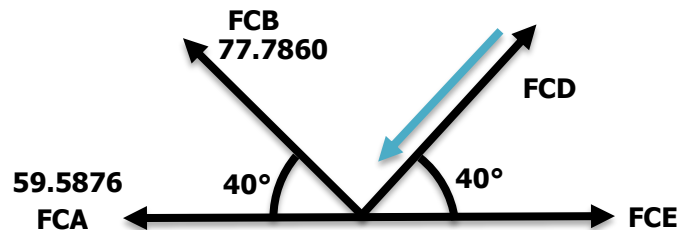
$$FBD = -FBC \sin_{50} - 59.5876$$

$$FBD = -77.7861 \sin_{50} - 59.5876$$

$$FBD = -59.5875 - 59.5876$$

$$FBD = -119.1751 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo C



$$\sum F_y = 0$$

$$77.786 \sin_{40} + FCD \sin_{40} = 0$$

$$49.9999 + FCD \sin_{40} = 0$$

$$FCD = \frac{-49.9999}{\sin_{40}} = -77.7860$$

$$FCD = -77.7860 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$-59.5876 + FCE - 77.7860 \cos_{40} + FCD \cos_{40} = 0$$

$$-59.5876 + FCE - 59.5875 + FCD \cos_{40} = 0$$

$$-119.1751 + FCE + FCD \cos_{40} = 0$$

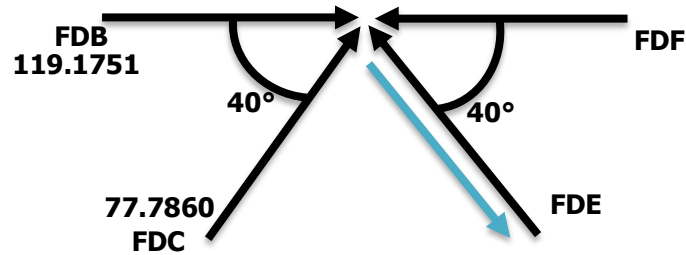
$$FCE = 119.1751 - FCD \cos_{40}$$

$$FCE = 119.1751 + 77.7860 \cos_{40}$$

$$FCE = 119.1751 + 59.5875$$

$$FCE = 178.7626 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo D



$$\sum F_y = 0$$

$$77.786 \text{ sen}_{40} + FDE \text{ sen}_{40} = 0$$

$$49.9999 + FDE \text{ sen}_{40} = 0$$

$$FDE = \frac{-49.9999}{\text{sen}_{40}} = -77.7860$$

$$FDE = -77.7860 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$119.1751 - FDF + 77.7860 \cos_{40} - FDE \cos_{40} = 0$$

$$119.1751 - FDF + 59.5875 - FDE \cos_{40} = 0$$

$$178.7626 - FDF - FDE \cos_{40} = 0$$

$$-FDF = 178.7626 + FDE \cos_{40}$$

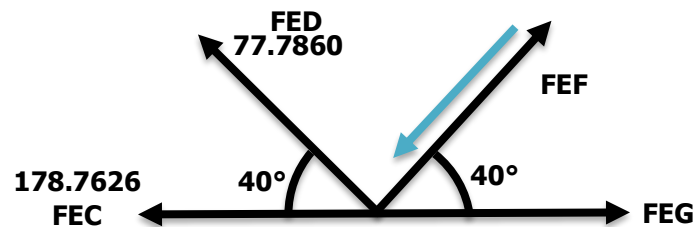
$$-FDF = 178.7626 - 77.7860 \cos_{40}$$

$$-FDF = 178.7626 + 59.5875$$

$$-FDF = -119.1751$$

$$FDF = 119.1751 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo E



$$\sum F_y = 0$$

$$77.786 \operatorname{sen}_{40} + FEF \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$49.9999 + FEF \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$FEF = \frac{-49.9999}{\operatorname{sen}_{40}} = -77.7860$$

$$FEF = -77.7860 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$-178.7626 + FEG - 77.7860 \cos_{40} + FEF \cos_{40} = 0$$

$$-178.7626 + FEG - 59.5875 + FEF \cos_{40} = 0$$

$$-238.3501 + FEG + FEF \cos_{40} = 0$$

$$FEG = 238.3501 - FEF \cos_{40}$$

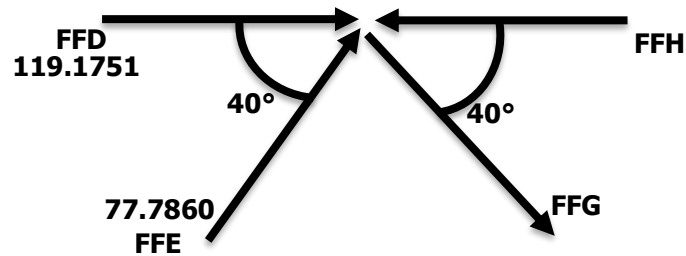
$$FEG = 238.3501 - (-77.7855 \cos_{40})$$

$$FEG = 238.3501 + 77.7855 \cos_{40}$$

$$FEG = 238.3501 + 59.5871$$

$$FEG = 297.9372 \text{ gr} * \text{mm}$$

Nodo F



$$\sum F_y = 0$$

$$77.7855 \operatorname{sen}_{40} - FFG \operatorname{sen}_{40} = 0$$

$$49.9995 - FFG \operatorname{sen}_{40} = 0$$

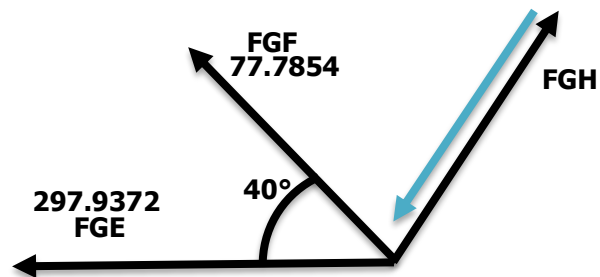
$$-FFG = \frac{-49.9995}{\operatorname{sen}_{40}} = -77.7854$$

$$-FFG = -77.7854 \text{ gr} * \text{mm}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\begin{aligned}
 119.1751 + 77.7855 \cos_{40} - FFH - FFG \cos_{40} &= 0 \\
 119.1751 + 59.5871 - FFH - FFG \cos_{40} &= 0 \\
 178.7622 - FFH - FFG \cos_{40} &= 0 \\
 178.7622 - FFH - 77.7854 \cos_{40} &= 0 \\
 178.7622 - FFH - 59.5870 \\
 -FFH &= -119.1752 \\
 FFH &= 119.1752 \text{ gr} * \text{mm}
 \end{aligned}$$

Nodo G



$$\begin{aligned}
 \sum F_y &= 0 \\
 77.7854 \sin_{40} + FGH \sin_{40} &= 0 \\
 49.9994 + FGH \sin_{40} &= 0 \\
 FGH &= \frac{-49.9994}{\sin_{40}} = -77.7852 \\
 FGH &= -77.7852 \text{ gr} * \text{mm}
 \end{aligned}$$

3.9 Alcances y enfoque de la investigación

TEC Cronograma de Actividades de Residencia Profesional

Alumno: Mendiola Vallon Hadassa No. de Control: 19TE0491 Período: Julio-Noviembre 2023
 Carrera: Ingeniería en Mecatrónica Semestre: 9o. Modalidad: Escolarizado
 Asesor(a): Carrasco Araoz Alfredo Teléfono: 232-100-70-00 Correo Electrónico: L19TE0491@teziutlan.tecnm.mx
 Título de Residencia: PROPUESTA DE DISEÑO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZO MANIPULADOR PARA LA RECOLECCIÓN DE GRANOS DE CAFÉ

Actividades	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Entrevista con el (a) asesor (a) interno (a) y externo (a)																												
Diseño del contenido del temario																												
Establecimiento del marco teórico																												
Conformación del primer capítulo																												
Cambio de título, empresa o asesor (a)																												
Interpretación de resultados																												
Conformación del segundo capítulo																												
Correcciones y sugerencias																												
Conformación del tercer capítulo																												
Conformación del cuarto capítulo																												
Conclusiones, anexos y bibliografía																												
Entrega de trabajo para última revisión																												
Asesor(a) realiza observaciones																												
El alumnado entrega de trabajo corregido																												
Asesor(a) libera residencia profesional, el estudiante solicita opción de titulación o entrega de tesis a la Subdirección Académica																												
La Subdirección Académica solicita jurado para examen profesional y comisión revisora, sólo en caso de tesis.																												
La División de Carrera informa comisión y jurado.																												
La Subdirección entrega ejemplar de tesis a la comisión revisora.																												
La Comisión realiza la revisión del trabajo y envía observaciones al alumnado mediante correo electrónico.																												
El alumnado realiza las correcciones y devuelve el trabajo mediante correo electrónico para autorización.																												
La comisión revisora informa que ha liberado el trabajo profesional por la opción de tesis a la Subdirección Académica.																												
La Subdirección Académica programa examen profesional y notifica al alumnado y al jurado.																												
El alumnado participa en el examen profesional.																												

ORIGINAL: DIVISIÓN DE CARRERA
 COPIA 1: ASESOR (A)
 COPIA 2: ALUMNO (A)

FIRMA DE ALUMNO (A) FIRMA DEL(A) ASESOR(A)

RECIBIDO 9 AGO 2023
 DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

R07/05/2021 F-SAC-09

Figura 41. Cronograma de actividades para el registro de residencia profesional.

- La propuesta de diseño y análisis cinemático de un brazo manipulador para la recolección de granos de café implica desarrollar un dispositivo mecánico especializado, utilizando principios de ingeniería, para recolectar de manera eficiente y precisa los granos de café en campos agrícolas. Este estudio se centrará en la creación de un brazo manipulador que optimice el proceso de recolección, considerando los datos obtenidos en la visita al cafetalero con el objetivo de mejorar la productividad y la calidad de la recolección de café.
- Investigación y análisis de la literatura existente sobre tecnologías de recolección de café y principios de ingeniería mecánica y cinemática.
- Identificación de los requisitos del brazo manipulador y desarrollo del diseño preliminar del brazo manipulador.
- Aplicación de principios cinemáticos para analizar el movimiento del brazo, utilización de software de SolidWorks.
- Realización de pruebas en entornos controlados y simulación de condiciones reales.
- Se centra en la región de Puebla donde la producción de café es significativa.
- La población objetivo estará compuesta por agricultores de café que emplean métodos tradicionales de recolección, así como aquellos que ya utilizan

tecnologías de recolección, pero que podrían beneficiarse de mejoras en eficiencia y precisión.

- Se utiliza el software SolidWorks para el diseño de las piezas que componen al brazo recolector de granos de café y para las pruebas de resistencia.
- Se utiliza la impresora 3D con el material "PLA" para imprimir las piezas del brazo recolector de granos de café.
- El diseño del brazo recolector de granos de café permite que se pueda abrir a nuevas investigaciones o innovaciones del mismo para así optimizar más este brazo recolector, añadiendo nuevas y más tecnologías.

3.10 Hipótesis

Se postula que, al diseñar y analizar un brazo manipulador específico para la recolección de granos de café en la región de Puebla, donde la tradición cafetalera es significativa, se logrará optimizar de manera considerable esta tarea. La aplicación de principios de ingeniería mecánica y cinemática en el diseño del dispositivo permitirá alcanzar niveles de eficiencia que superan notablemente la calidad de la recolección manual, que sigue siendo una laboriosa y a menudo ineficiente tarea. Además, se hipotetiza que la implementación de este brazo manipulador no solo mejorará la calidad de la cosecha, sino que también contribuirá a la reducción de costos operativos asociados con la recolección manual, generando así un impacto positivo en la productividad y rentabilidad de los productores de café en la región.

3.11 Diseño y metodología de la investigación

1. Análisis del Proceso de Recolección del Café

- Se realizará una visita a los huertos de cultivo de café para obtener una comprensión detallada del proceso de recolección, identificando sus desafíos y requerimientos específicos.

2. Desarrollo de la Ingeniería de Concepto

- A partir del análisis del proceso de recolección, se llevará a cabo la ingeniería de concepto para definir las características y funcionalidades esenciales del brazo manipulador.

3. Desarrollo de la Ingeniería Básica y de Detalle

- Se avanzará en la ingeniería del brazo manipulador, desarrollando tanto los aspectos básicos como los detalles necesarios para su construcción y funcionamiento.

4. Diseño de Prototipos Iterativos

- Se diseñarán y construirán varios prototipos del brazo manipulador, evaluando su desempeño en la recolección de granos de café, con el objetivo de llegar al prototipo más adecuado a las necesidades establecidas.

5. Modelado en SolidWorks

- Utilizando el software SolidWorks, se diseñarán los componentes del brazo manipulador seleccionado, asegurando la viabilidad y la optimización de su funcionalidad.

6. Modelo Cinemático y Cálculo de Armaduras

- Se desarrollará el modelo cinemático del brazo manipulador, realizando cálculos de armaduras para garantizar su correcto desempeño durante la recolección de granos de café.

7. Pruebas de Análisis de Esfuerzos

- Se llevarán a cabo diversas pruebas de análisis de esfuerzos utilizando el software SolidWorks, evaluando la resistencia y durabilidad del brazo manipulador en condiciones simuladas.

8. Impresión 3D del Prototipo Final

- Se procederá a la impresión 3D del brazo manipulador utilizando PLA como material, para materializar el diseño final y verificar su fabricación física.

9. Pruebas de Concepto en Ambiente Controlado

- Se realizarán pruebas de concepto del brazo manipulador en un ambiente controlado, evaluando su desempeño real y ajustando cualquier aspecto necesario para lograr la eficacia deseada en la recolección de granos de café.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

4.1 Resultados del análisis de armadura en viga

A continuación, se pueden ver los resultados de cada una de las barras, el máximo valor se puede ver en la barra 8 con un valor de -3.506N*Mpa .

Barra 1		
$F_{1x} = 0.5844$	$F_{1y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{2x} = 0.5844$	$F_{2y} = 0.4903$	
Barra 2		
$F_{2x} = 0.5844$	$F_{2y} = 0.4903$	$F_N = 0.7629$
$F_{3x} = 0.5844$	$F_{3y} = -0.4903$	
Barra 3		
$F_{3x} = 0.5844$	$F_{3y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{4x} = -0.5844$	$F_{4y} = -0.4903$	
Barra 4		
$F_{4x} = -0.5844$	$F_{4y} = 0.4903$	$F_N = 0.7629$
$F_{5x} = 0.5844$	$F_{5y} = -0.4903$	
Barra 5		
$F_{5x} = 0.5844$	$F_{5y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{6x} = -0.5844$	$F_{6y} = -0.4903$	
Barra 6		
$F_{6x} = -0.5844$	$F_{6y} = 0.4903$	$F_N = 0.7629$
$F_{7x} = 0.5844$	$F_{7y} = -0.4903$	
Barra 7		
$F_{7x} = 0.5844$	$F_{7y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{8x} = -0.5844$	$F_{8y} = -0.4903$	
Barra 8		
$F_{1x} = 3.506$	$F_{1y} = 0$	$F_N = -3.506$
$F_{3x} = -3.506$	$F_{3y} = 0$	
Barra 9		
$F_{2x} = -2.922$	$F_{2y} = 0$	$F_N = 2.922$
$F_{4x} = 2.922$	$F_{4y} = 0$	
Barra 10		
$F_{3x} = 2.338$	$F_{3y} = 0$	$F_N = -2.338$
$F_{5x} = -2.338$	$F_{5y} = 0$	
Barra 11		
$F_{1x} = 0.5844$	$F_{1y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{2x} = 0.5844$	$F_{2y} = 0.4903$	
Barra 12		
$F_{1x} = 0.5844$	$F_{1y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{2x} = 0.5844$	$F_{2y} = 0.4903$	

Barra 13		
$F_{1x} = 0.5844$	$F_{1y} = 0.4903$	$F_N = -0.7629$
$F_{2x} = 0.5844$	$F_{2y} = 0.4903$	

Tabla 14. Resultados de las 13 barras en la calculadora de armaduras isostáticas. Elaboración propia en: https://valdivia.staff.jade-hs.de/starrkoerper_es.html

Apoyos		
$F_{1x} = 4.901$	$F_{1y} = 0.4903$	$ F_1 = 4.120$
$F_{2x} = -4.901$	$F_{2y} = 0$	$ F_2 = 4.091$

Tabla 15. Apoyos en X y Y. Elaboración propia en: https://valdivia.staff.jade-hs.de/starrkoerper_es.html

En el nodo 1 se encuentra una reacción en x con el valor de 4.901 y una reacción en y de 0.4903. en el nodo 2 se encuentra una reacción en x de -4.901 y una reacción en y de 0 por la carga aplicada de 50 gramos.

4.2 Material PLA para la impresión 3D

La elección del filamento para la impresión del brazo manipulador es un paso crucial en el proceso de fabricación, y en este caso, se optó por un filamento de la marca Impresoras 3D Puebla en colores verde y blanco.

Este filamento no solo aporta propiedades físicas y mecánicas específicas, sino que también brinda opciones estéticas, permitiendo personalizar la apariencia del brazo manipulador.

Una vez seleccionado el filamento, se procedió a medir su longitud, diámetro y peso. Estas medidas son esenciales para calcular la densidad del material, un parámetro fundamental para configurar correctamente el filamento en el software SolidWorks. La longitud del filamento proporciona información sobre la cantidad disponible para la impresión, mientras que el diámetro es crucial para la precisión en la extrusión durante el proceso de impresión 3D. Además, el peso del filamento es un indicador directo de la cantidad de material utilizado.

Con estos datos recopilados, se calcula la densidad del filamento, que se configura en el software SolidWorks. La densidad es un factor clave para la simulación precisa del comportamiento del material durante el análisis estructural. Configurar correctamente la densidad del filamento en SolidWorks asegura que las simulaciones y los resultados reflejen de manera precisa las propiedades mecánicas del material utilizado en la realidad.

La cuidadosa consideración del filamento utilizado para la impresión 3D, junto con la medición detallada y la configuración precisa en SolidWorks, es esencial para garantizar que el modelo virtual del brazo manipulador sea una representación fiel del prototipo físico, facilitando así una evaluación precisa de su rendimiento y comportamiento en el mundo real.



Figura 42. Filamento para impresión 3D color verde. Obtenido de: <https://www.impresoras3dpuebla.com/pla>



Figura 43. Filamento para impresión 3D color blanco. Obtenido de: <https://www.impresoras3dpuebla.com/pla>

4.3 Datos del filamento

De acuerdo a los datos del filamento obtenemos el resultado de la densidad:

$$longitud = 300m$$

$$\begin{aligned} peso &= 1Kg \\ diámetro &= 1.75mm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} radio &= 0.000875m \\ A &= \pi r^2 \\ A &= 3.1416(0.000875^2) = 2.4052 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= (A)(l) \\ V &= 2.4052 \times 10^{-6}(300m) = 7.21586 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{v} \\ \rho &= \frac{1}{7.21586 \times 10^{-4}} = 1385.8362Kg/m^3 \end{aligned}$$

El artículo "Caracterización mecánica de piezas de ácido poliláctico, policaprolactona y Lay-Fomm 40 fabricadas por modelado de deposición fundida, en función de los parámetros de impresión" proporcionó datos valiosos relacionados con propiedades mecánicas clave de los materiales utilizados en la impresión 3D.

Estos datos son esenciales para comprender cómo las variables de impresión afectan no solo la apariencia, sino también el rendimiento mecánico de las piezas impresas.

Material	P [%]	A [°]		E [MPa]	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]
PLA	30	0-90	$\bar{x}$	25.96	41.2	48.37
			s	1.80	4.42	1.91
		45-135	$\bar{x}$	12.61	27.76	30.87
			s	0.43	2.30	2.50
	40	0-90	$\bar{x}$	23.88	29.67	33.04
			s	1.06	2.08	2.54
		45-135	$\bar{x}$	15.41	31.00	36.27
			s	0.13	1.00	1.71
PCL	30	0-90	$\bar{x}$	6.93	-	9.68
			s	0.14	-	1.46
		45-135	$\bar{x}$	4.7	6.6	7.52
			s	0.30	0.44	0.89
	40	0-90	$\bar{x}$	7.24	9.92	10.28
			s	0.07	0.14	0.58
		45-135	$\bar{x}$	4.16	6.38	6.99
			s	0.11	0.13	0.62
Lay-Fomm 40	30	0-90	$\bar{x}$	1.65	3.53	28.24
			s	0.18	0.42	2.16
		45-135	$\bar{x}$	0.72	1.77	12.26
			s	0.18	0.31	2.30
	40	0-90	$\bar{x}$	1.28	2.65	18.97
			s	0.18	0.39	3.17
		45-135	$\bar{x}$	1.07	2.82	21.50
			s	0.19	0.78	0.70

Figura 44. Resultados prueba de tensión para PLA, PCL y Lay-Fomm 40. : promedio, S: desviación estándar, P: porcentaje de relleno, A: ángulo de trama. (Zuleima, 2019).

Material	P [%]	A [°]		E _{compresión} [MPa]	σ _{U-compresión} [MPa]
PLA	30	0-90	$\bar{X}$	5.12	6.79
			s	2.23	2.36
	40		$\bar{X}$	4.89	6.86
			s	0.60	1.14
PCL	30	0-90	$\bar{X}$	1.96	1.32
			s	0.8	0.41
	40		$\bar{X}$	2.17	1.17
			s	0.70	0.36

Ilustración 45. Resultados prueba de compresión para PLA y PCL. : promedio, S: desviación estándar, P: porcentaje de relleno, A: ángulo de trama. (Zuleima, 2019).

Material

Buscar...

- SolidWorks DIN Materials
- solidworks materials
- Sustainability Extras
- Materiales personalizados
 - Plástico
 - PLA TESIS

Propiedades | Apariencia | Rayado | Personalizado | Datos de aplicación | Favoritos | Chap...

Propiedades de material

No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal ☐ Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: SI - N/mm² (MPa)

Categoría: Plástico

Nombre: PLA TESIS

Descripción: -

Origen:

Sostenibilidad: No definido

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	25.96	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.498	N/D
Módulo cortante	12.928	N/mm ²
Densidad de masa	1385.8362	kg/m ³
Límite de tracción	48.37	N/mm ²
Límite de compresión	6.79	N/mm ²
Límite elástico	41.2	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.2256	W/(m·K)
Calor específico	1386	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Figura 46. Configuración del material "PLA TESIS" con las especificaciones obtenidas en el software SolidWorks. Autor propio.

Los parámetros tomados de estas tablas fueron: modulo elástico, coeficiente de poisson, modulo cortante, límite de tracción, límite de compresión y límite elástico. Una vez que se establecieron las propiedades con sus valores específicos se configuró este material para las piezas que integran el brazo manipulador, esto para que pudiéramos observar la obtención de los resultados de cada uno de los análisis aplicados y así ver cómo es que se comporta ante cargas y sujeciones establecidas.

4.4 Resultados de diseño en viga

Dentro del brazo manipulador se tienen dos eslabones, ambos con las mismas medidas por lo que para realizar los análisis siguientes se pueden aplicar solamente a uno de los dos eslabones ya que la carga aplicada al último, donde se encuentra la garra se transmite directamente al eslabón primero.

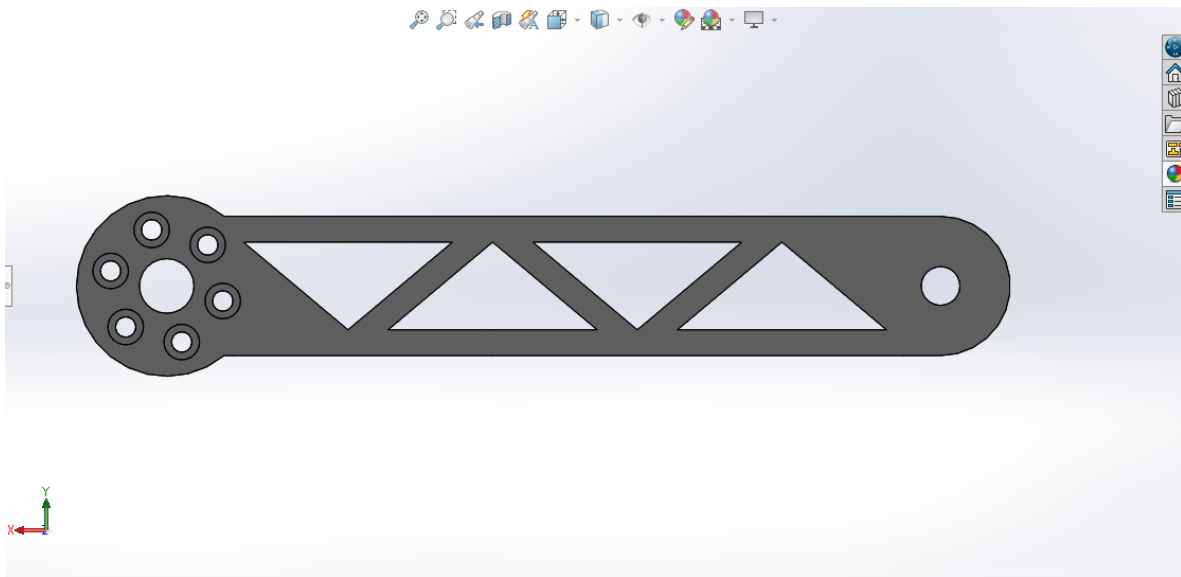


Figura 47. Componente “Brazo” el cual se toma como viga, para estudio en el software SolidWorks. Autor propio.

Se tomó el eslabón y se hizo un corte en la parte donde se ensambla con el primer eslabón, se aplicó una sujeción en la cara fija 1 y una fuerza con valor de 3.506 en una dirección invertida, valor que se obtuvo mediante el desarrollo y análisis de armaduras en donde se observó que la mayor tensión está en la barra número 8.

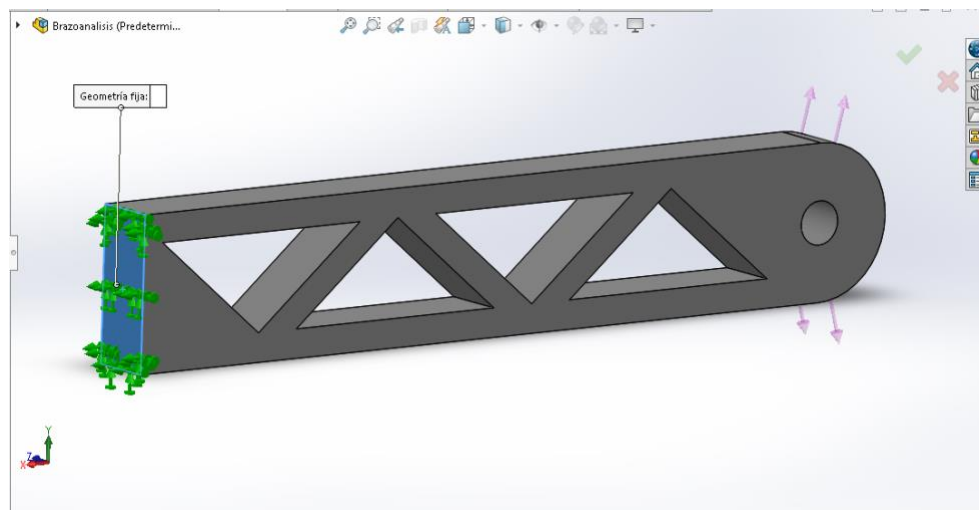


Figura 48. Componente “Brazo” modificado, con enfoque en la sujeción, en el software SolidWorks. Autor propio.

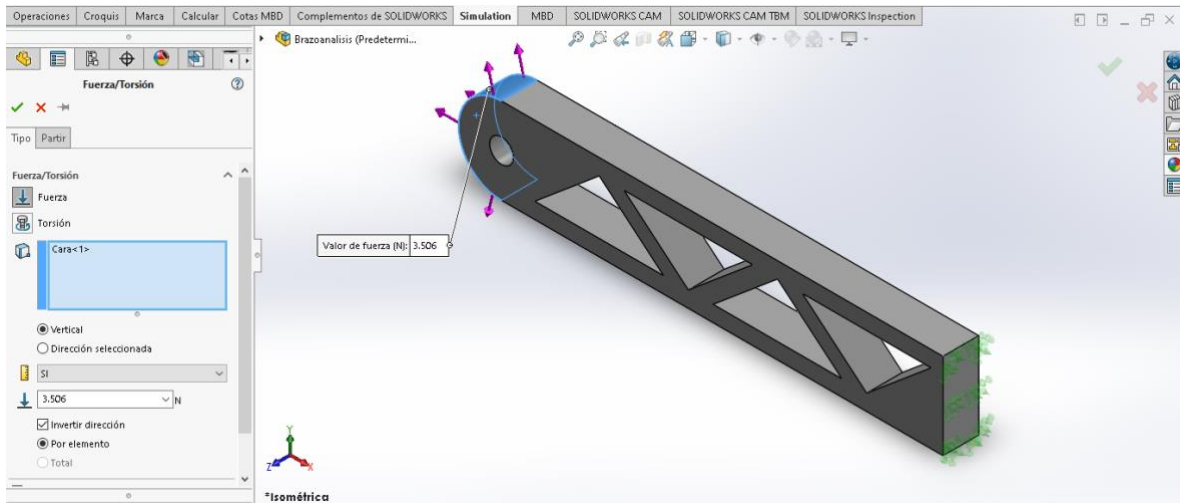


Figura 49. Componente “Brazo” modificado, con enfoque en la carga aplicada, en el software SolidWorks. Autor propio.

4.4.1 Tensión nodal VonMises en viga

La tensión de VonMises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. Se usa para el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño de nuestro brazo manipulador.

El análisis nos mostró una tensión nodal, un límite elástico de 41.200(MPa) como lo definimos anteriormente en la propiedad del material que ocupamos para estos componentes, además un valor máximo de 0.087MPa.

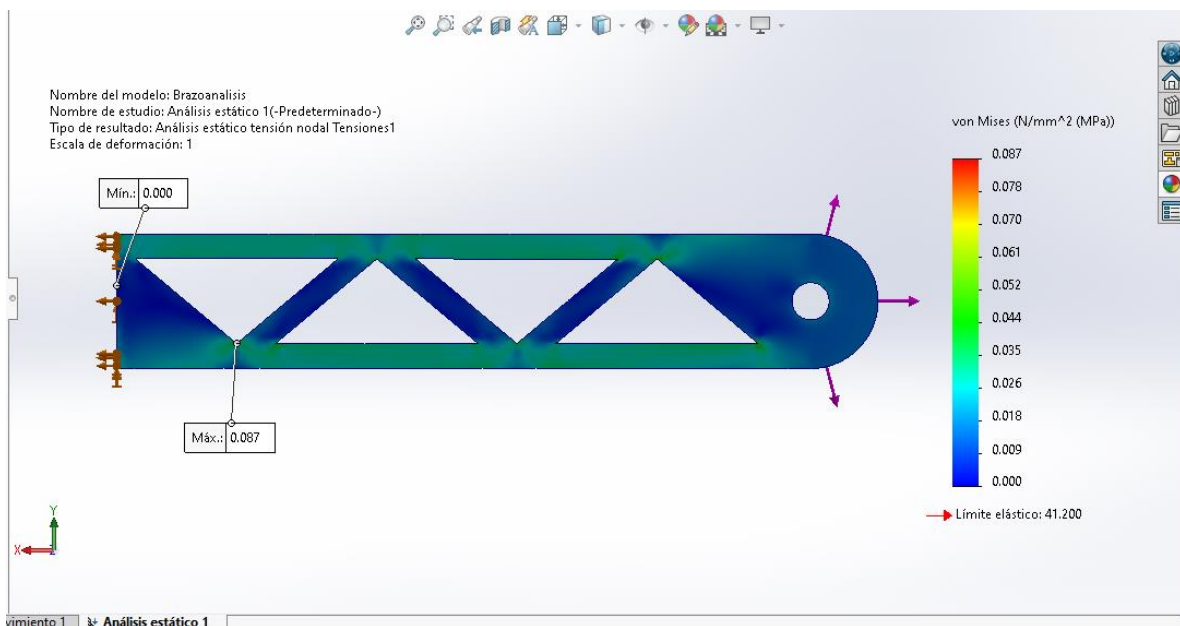


Figura 50. Tensión VonMises en escala real, en el software SolidWorks. Autor propio.

El valor máximo se encuentra en el nodo 3 en la barra 8, ya que a la hora de que se aplica la fuerza de los 3.506N en el extremo ejerce una tensión en el extremo opuesto, el cual está marcado con un punto rojo. El valor mínimo de esta viga se

encuentra situado en la cara fija donde se aplicó la sujeción.

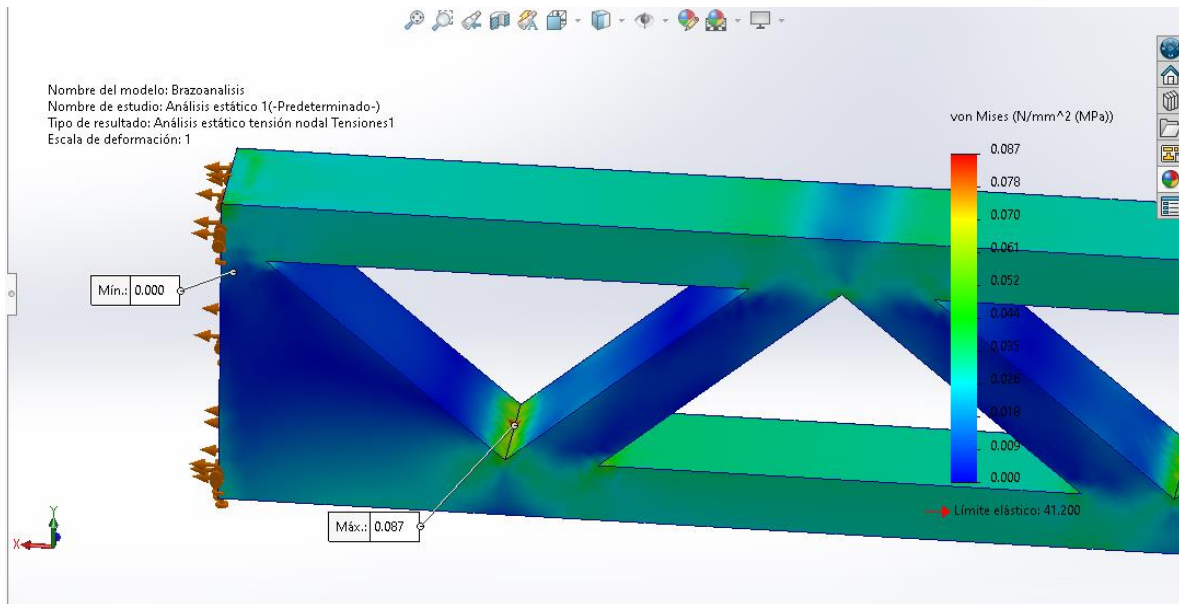


Figura 51. Resultado de punto máximo de tensión en la viga, en el software SolidWorks. Autor propio.

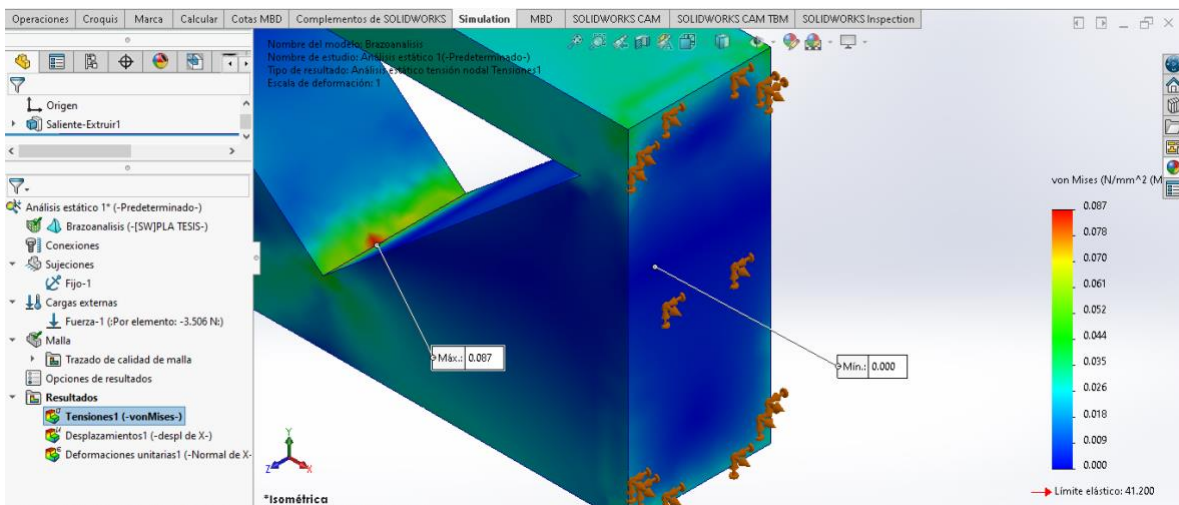


Figura 52. Punto de tensión mínima en la viga, en el software SolidWorks. Autor propio.

En la siguiente imagen se aprecia la misma tensión de VonMises aplicada a la viga, pero en una escala más grande lo cual nos permite apreciar de una manera más clara lo que sucede con esta viga al momento de aplicar la carga. En esta viga, la tensión de VonMises se explica fijándola de un extremo y en el extremo contrario aplicando una fuerza la cual cumple la función de jalar este eslabón en sentido a la carga, así con los resultados obtenidos se tiene un comportamiento correcto donde la viga soporta de manera exitosa esta tensión aplicada.

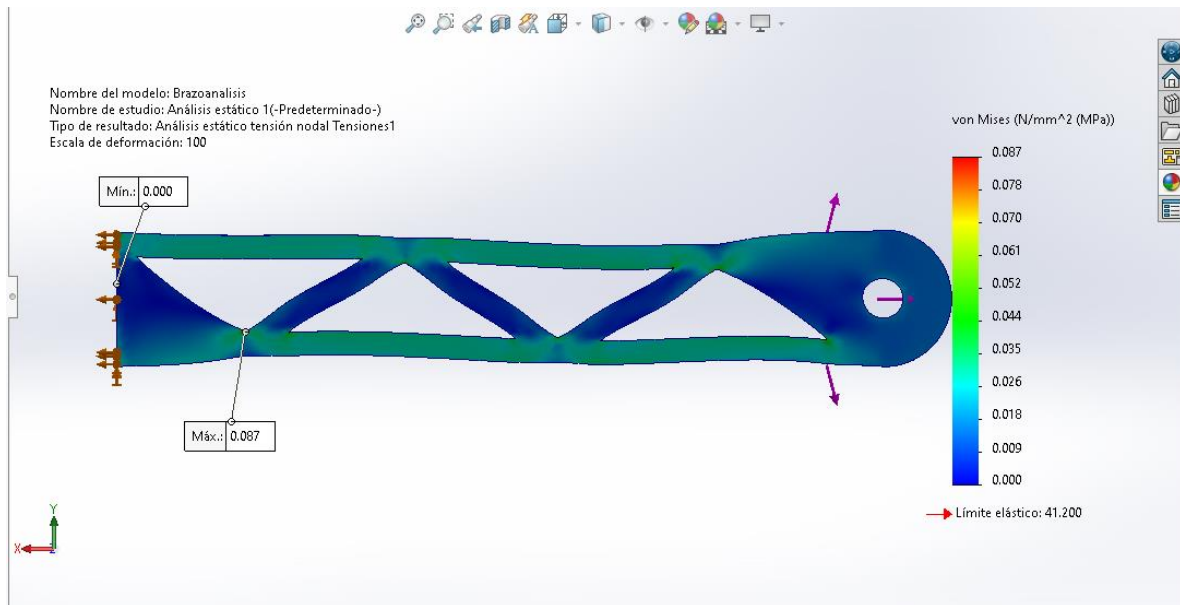


Figura 53. Tensión de VonMises escala establecida a 100, en el software SolidWorks. Autor propio.

4.4.2 Desplazamiento estático en X en la viga

Se seleccionó el desplazamiento en x, ya que, como se puede observar en la imagen, la viga está situada en el plano x, por lo tanto, su desplazamiento resultante de este estudio se mostró en este plano.

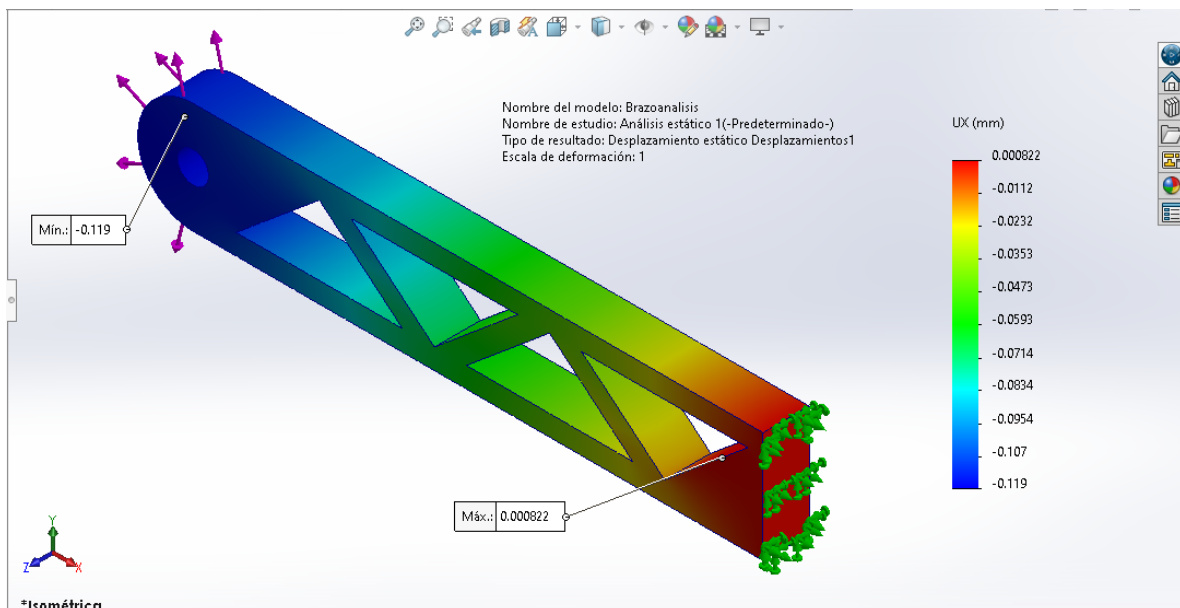


Figura 54. Desplazamiento en "x", valor máximo y mínimo, en el software SolidWorks. Autor propio.

Los resultados del desplazamiento en x nos muestran un valor máximo de 0.000822mm y un valor mínimo de -0.119 unidades por lo que se puede observar que existe un desplazamiento pero que este está dentro del límite correcto.

Con la escala de deformación a 100 podemos observar de una manera más clara el movimiento que simula al aplicar la tensión en el extremo de la viga.

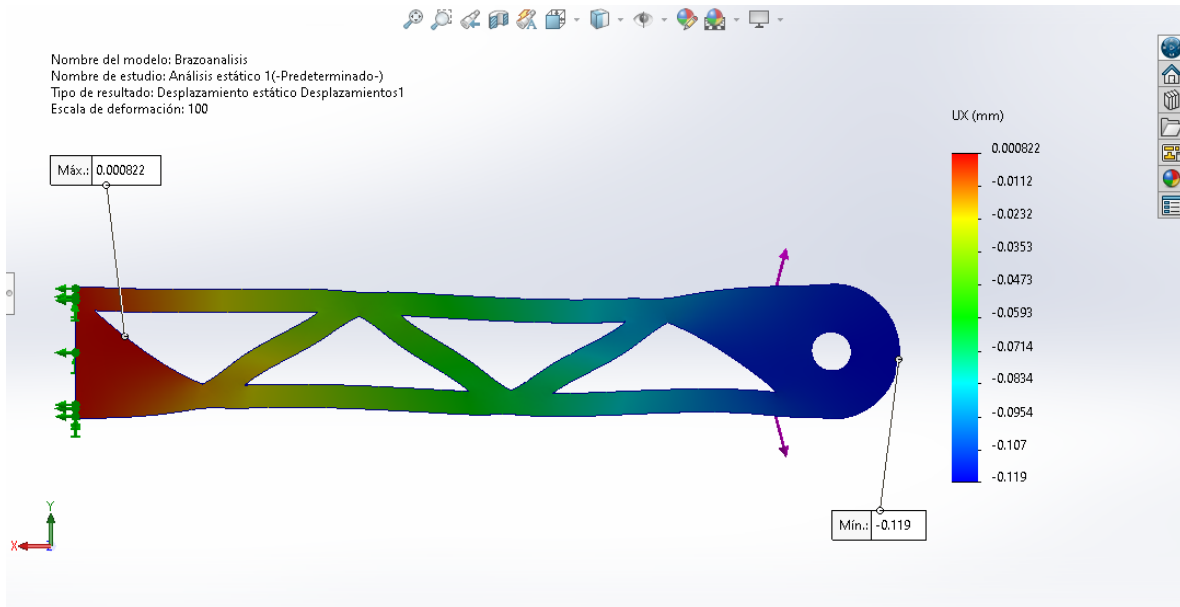


Figura 55. Desplazamiento en "x", escala definida a 100, en el software SolidWorks. Autor propio.

2.1.5 Deformación unitaria normal en dirección a X en la viga

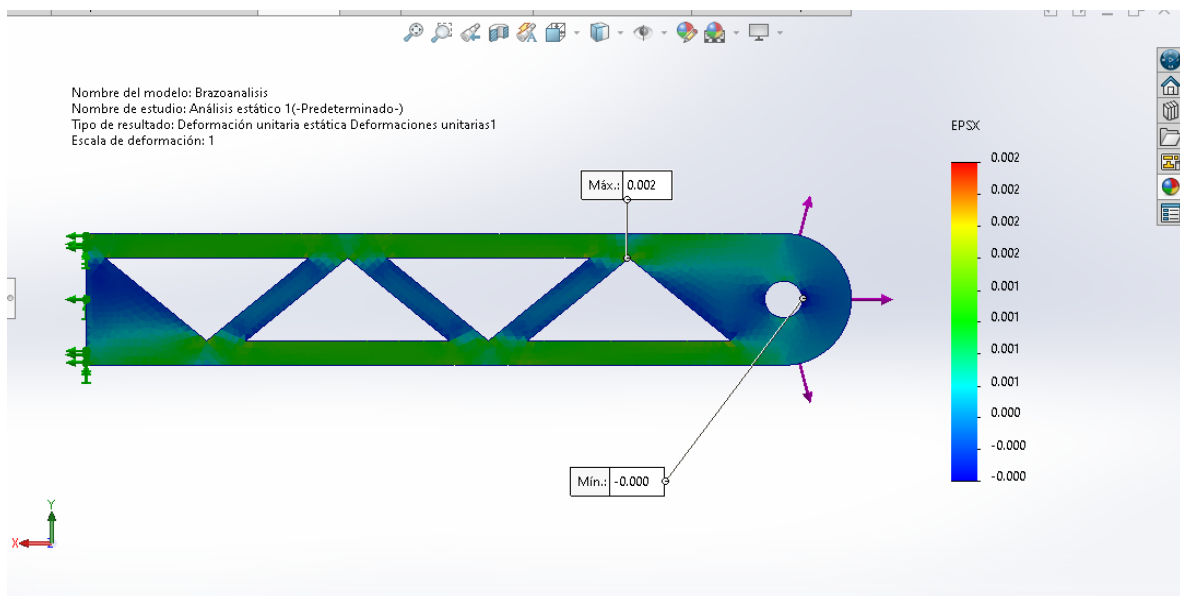


Figura 56. Deformación unitaria en X, escala real, en el software SolidWorks. Autor propio.

La deformación unitaria (δ) se define como el cambio de longitud, por unidad de longitud, debido a una carga normal sobre un material. Esta se puede relacionar directamente con el esfuerzo generado sobre el material al dividir la carga que

genera la deformación entre el área transversal del material.

Se observa una deformación unitaria máxima de 0.002 unidades en la unión del último nodo cercano a la ubicación de la carga. Esta magnitud indica la cantidad de deformación experimentada por la estructura en relación con su longitud original.

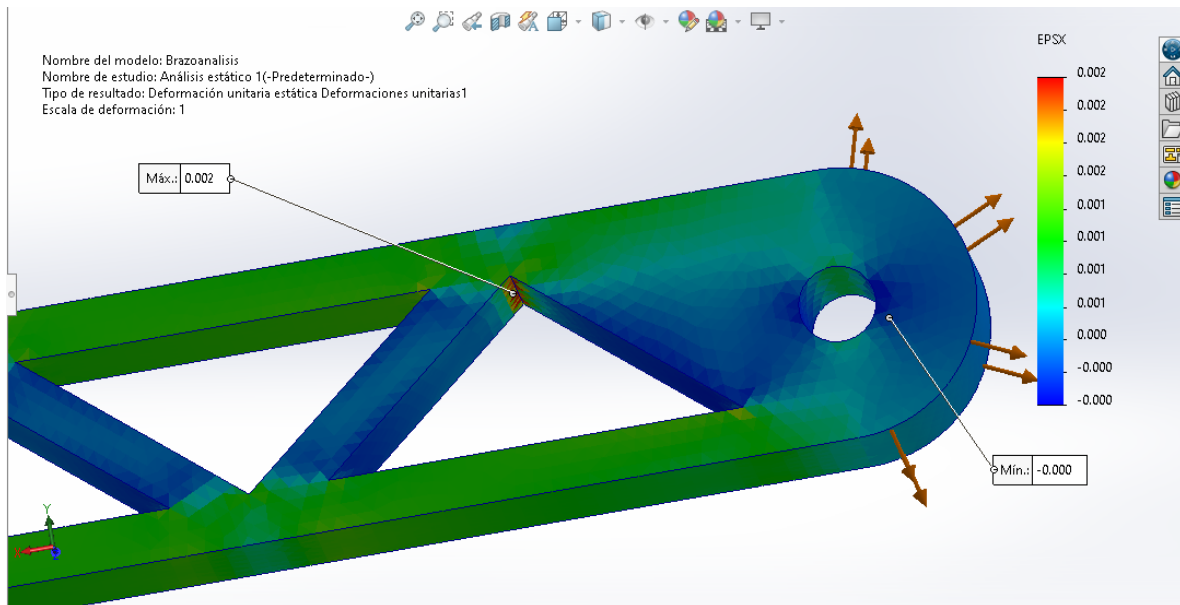


Figura 57. Deformación unitaria normal en dirección a X, escala real, en el software SolidWorks. Autor propio.

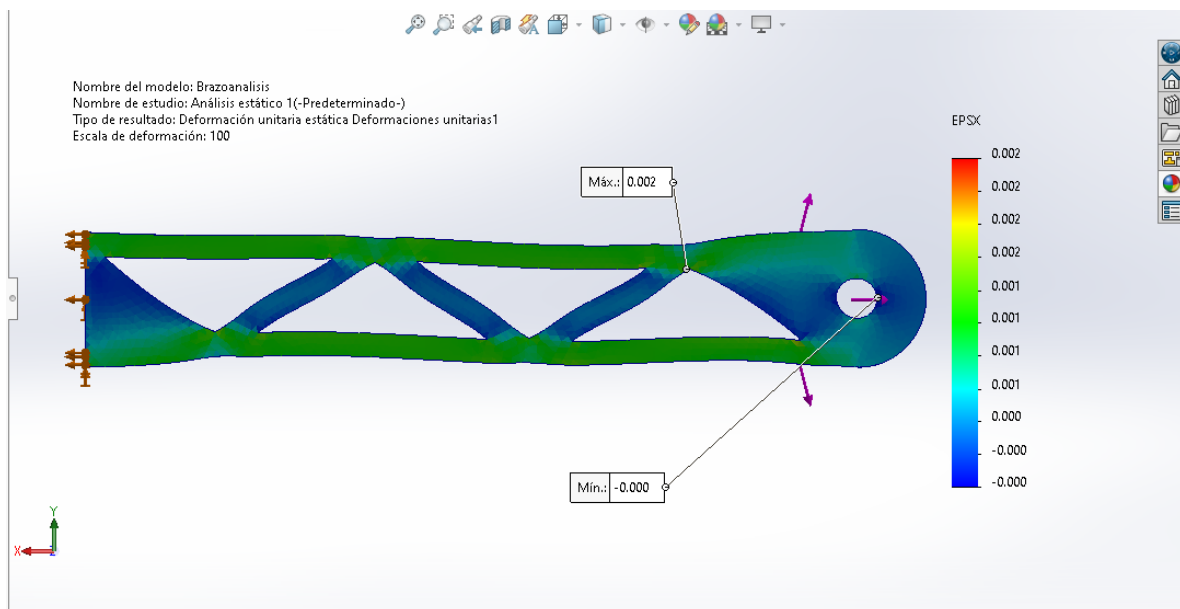


Figura 58. Deformación unitaria normal en dirección a X, escala definida a 100, en el software SolidWorks. Autor propio.

Es importante señalar que la deformación unitaria se expresa comúnmente como un cambio relativo en la longitud de un material bajo la influencia de una carga externa. En este estudio la deformación unitaria máxima de 0.002 indica que la longitud de la región analizada ha aumentado en un 0.2% con respecto a su longitud original.

Además, se observa un valor mínimo de deformación unitaria de 0 en el área donde se aplica la carga de -3.506N. Es interesante notar que la deformación unitaria mínima es cero en esta ubicación, lo cual podría indicar una transmisión eficiente de la carga sin deformación significativa en ese punto específico. La carga de -3.506N sugiere una fuerza aplicada en la estructura, y la deformación unitaria negativa podría interpretarse como una contracción en la región afectada.

4.5 Resultados de diseño en viga completa

Se coloca una sujeción fija en la cara de la parte interior donde se unirá con el eslabón número 1, a esta viga se le aplica la fuerza de 50gr en la arista superior, el valor de esta fuerza se establece de acuerdo a que 1 ramo de granos de café contiene alrededor de 10-15 cerezas y cada grano de café pesa 2 gramos por lo que se concluye un total de 30gr de peso, de acuerdo a esto, se toma 1.6 de factor de seguridad ante este gramaje, subiendo a 50gr el peso total.

$$50gr = 0.490332N$$

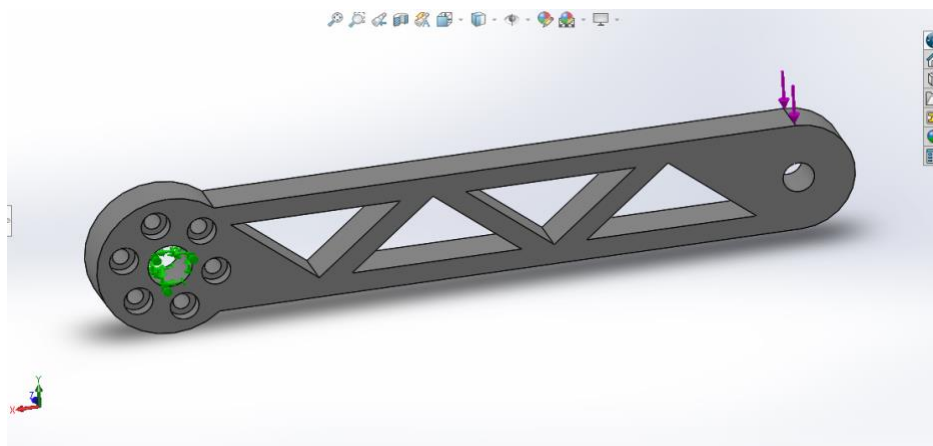


Figura 59. Sujeción y fuerza aplicada a la viga en el software SolidWorks. Autor propio.

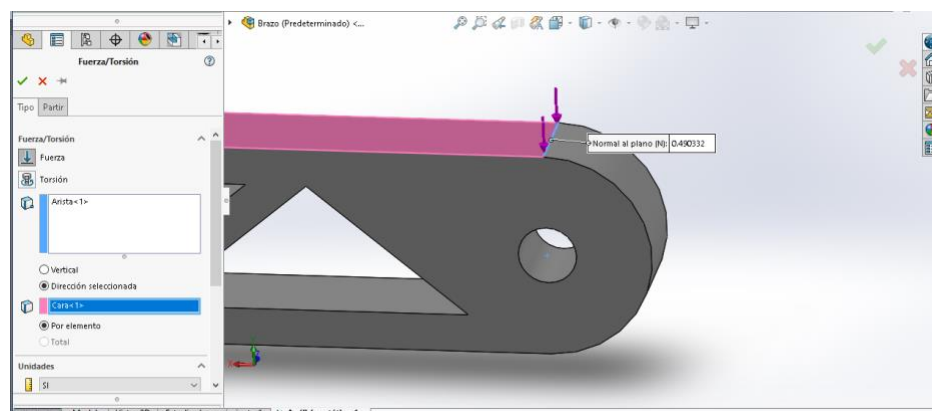


Figura 60. Dirección y valor de la fuerza aplicada en viga en el software SolidWorks. Autor propio.

4.5.1 Tensión nodal VonMises en viga completa

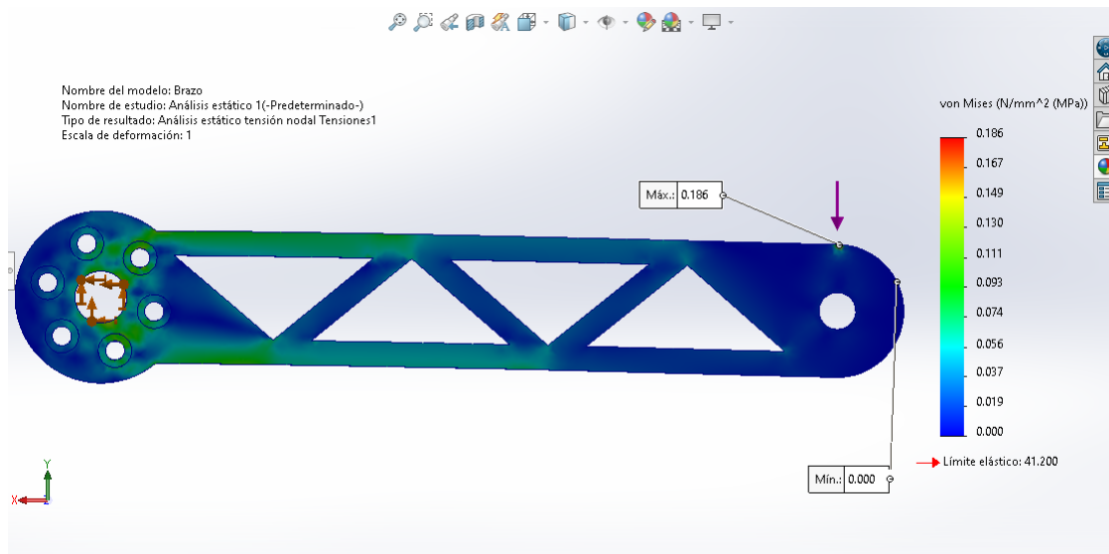


Figura 61. Tensión nodal VonMises el software SolidWorks. Autor propio.

En el resultado se observa una tensión máxima de 0.186MPa, se compara y está por debajo del límite elástico que es de 41.200MPa por lo que se interpreta que está correcto, este está situado en el lugar donde se aplica la fuerza de los 0.490332N equivalente al peso del ramo de café que el brazo manipulador debe soportar y un valor mínimo de 0 reflejado en el extremo del eslabón.

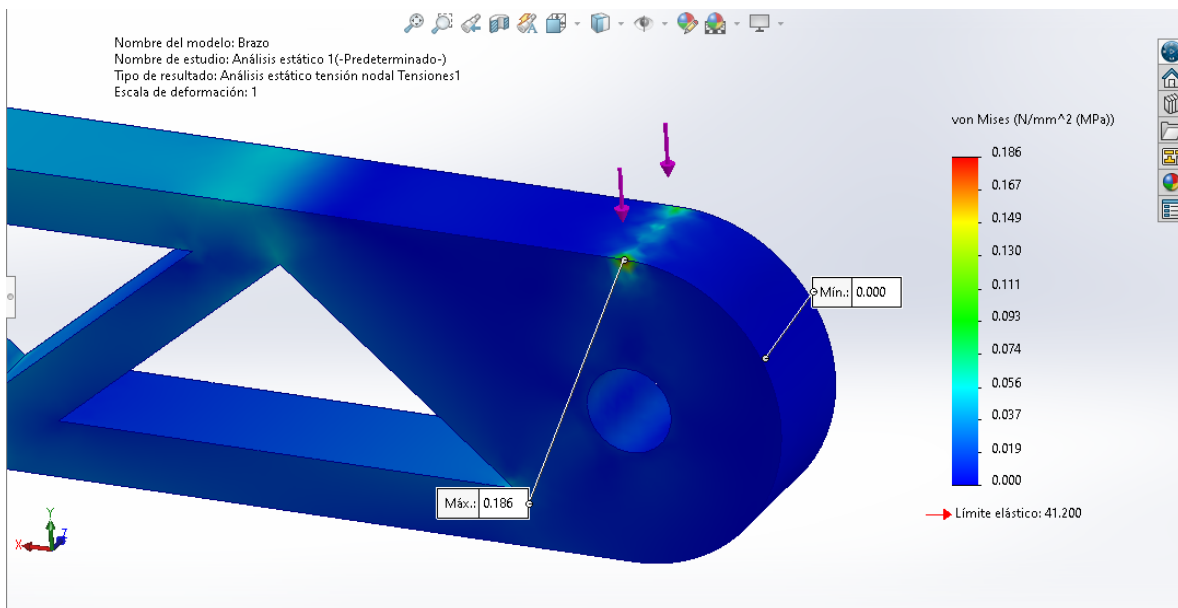


Figura 62. Máxima y mínima tensión de VonMises aplicada en la viga dentro del software SolidWorks. Autor propio.

4.5.2 Desplazamiento estático en Y en la viga completa

En el resultado del análisis de desplazamiento estático en Y se observa que, hay un desplazamiento máximo de 0.038mm y un desplazamiento mínimo de -2.561mm en la parte de la viga donde se aplica la fuerza, este desplazamiento se da hacia abajo, 2mm si es un valor considerable debido a que su material de fabricación es PLA, sin embargo, no llega a su ruptura.

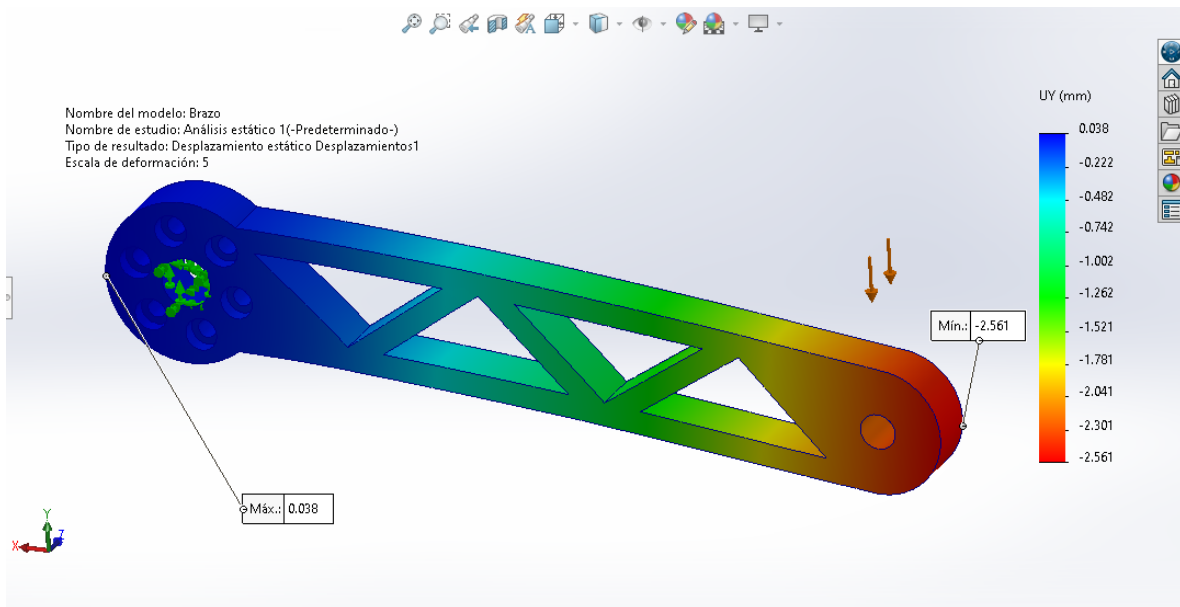


Figura 63. Desplazamiento estático en Y de la viga dentro del software SolidWorks. Autor propio.

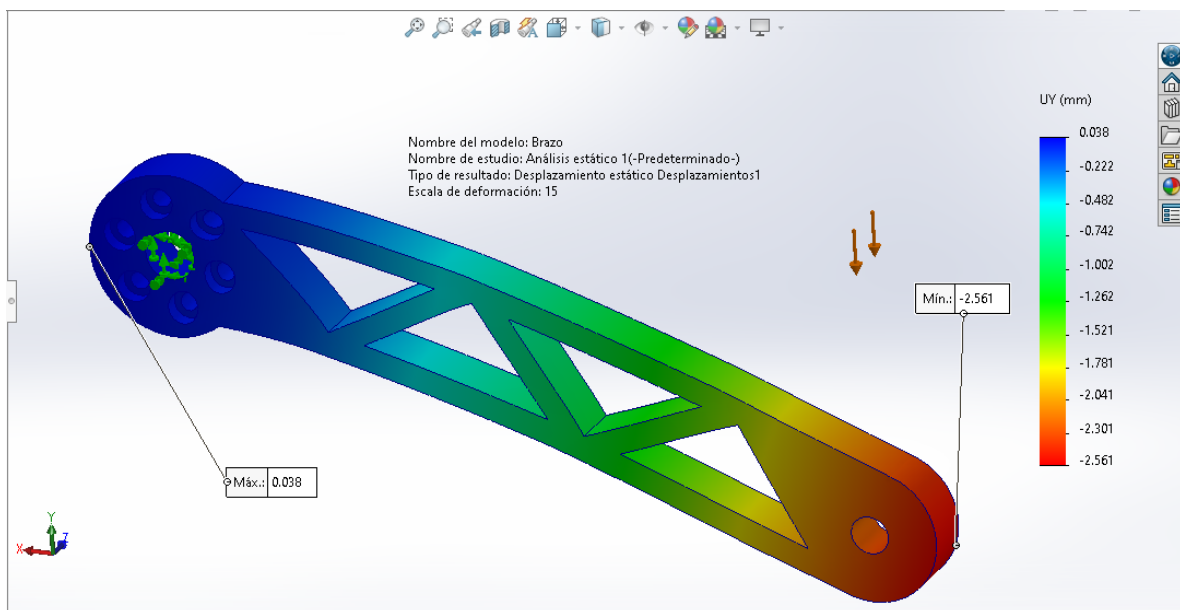


Figura 64. Desplazamiento estático en Y de la viga con escala a 15 dentro del software SolidWorks. Autor

4.5.3 Deformación unitaria estática equivalente

La deformación unitaria es una magnitud adimensional que proporciona información clave sobre la respuesta de un material o estructura ante una carga externa. En el contexto mencionado, se identificó un valor máximo de deformación unitaria de 0.006. Este valor específico refleja la relación entre el cambio en la longitud de una sección determinada y su longitud original.

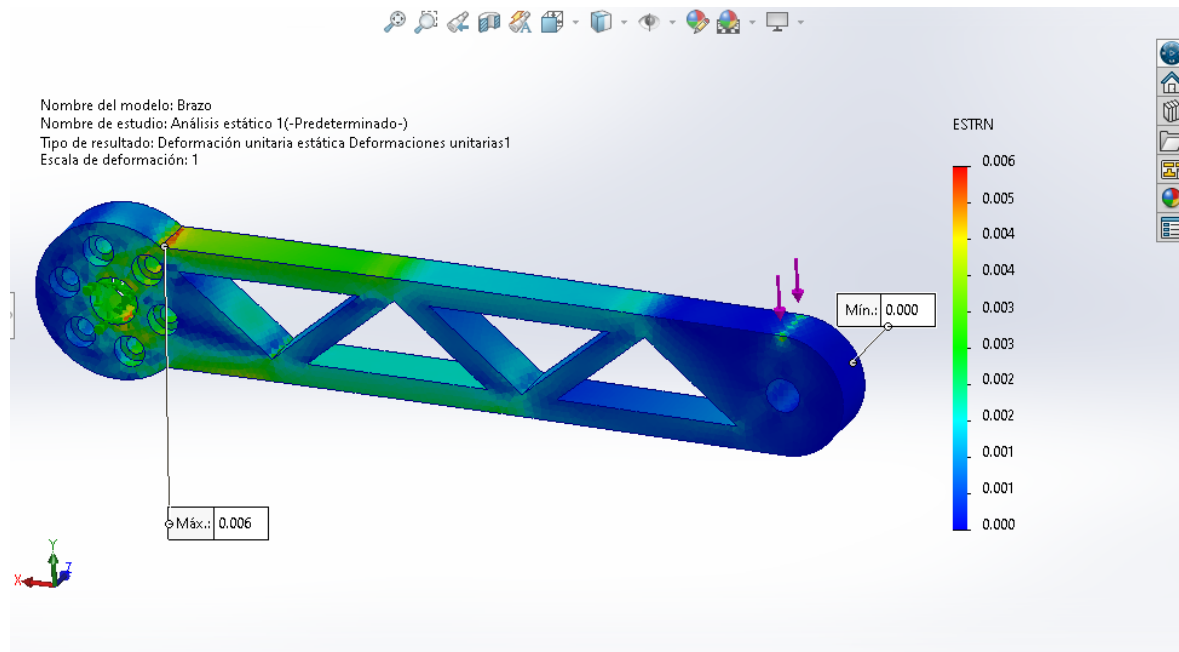


Figura 65. Deformación unitaria equivalente en la viga con escala normal dentro del software SolidWorks. Autor propio.

La deformación unitaria se expresa como un valor fraccional, indicando el cambio relativo en longitud. En este caso, el valor máximo de 0.006 señala que la longitud de la región analizada ha experimentado un aumento del 0.6% con respecto a su longitud inicial. Esta información es fundamental para comprender cómo la estructura responde y se deforma bajo la influencia de las fuerzas aplicadas. Además, la magnitud de la deformación unitaria puede ser indicativa de la elasticidad del material. Un valor de 0.006 sugiere una deformación relativamente pequeña, lo que podría ser un indicativo de un material que mantiene su forma original de manera eficiente bajo cargas aplicadas, mostrando un comportamiento elástico. Mediante la escala definida se observa su comportamiento de una manera más clara.

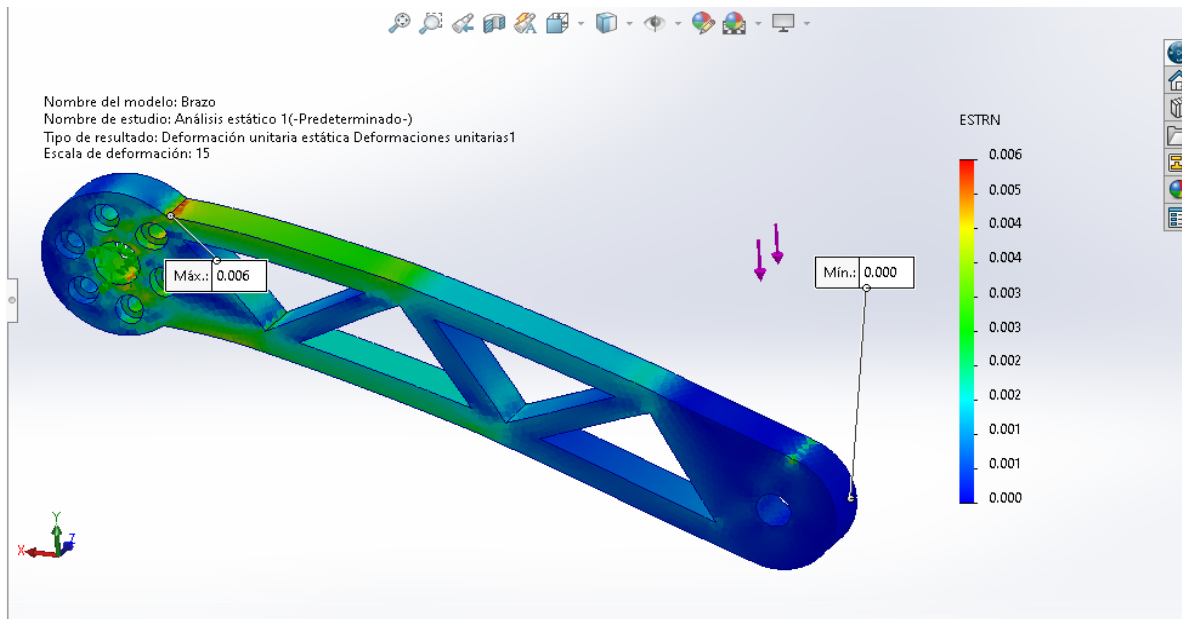


Figura 66. Deformación unitaria equivalente en la viga con escala definida a 15 dentro del software SolidWorks. Autor propio.

4.6 Resultado de la hipótesis

La presente investigación respalda la validez de la hipótesis al diseñar un brazo manipulador para la recolección de café en Puebla. La implementación demostró una optimización significativa, superando la recolección manual en eficiencia y calidad. Los beneficios incluyen la reducción de mano de obra, integración tecnológica amigable con el medio ambiente, y la apertura a innovaciones futuras. Este enfoque se revela como una solución prometedora para fortalecer la sostenibilidad y productividad en la tradición cafetalera regional.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones del proyecto, recomendaciones y experiencia profesional y personal adquirida.

La presente tesis se centró en hacer una propuesta de diseño de un brazo manipulador para la recolección de granos de café.

Tradicionalmente la cosecha de granos de café se realiza mediante la mano de obra de los trabajadores, tarea que en su mayoría de veces no es precisa ni segura para la integridad de sus vidas.

La implementación de un brazo manipulador para la recolección de granos de café buscó facilitar, hacer más precisa y mejorar la realización de esta tarea implementando las tecnologías del área de la mecatrónica y aplicarlas al área agrícola.

Experiencia profesional y personal adquirida

La realización de esta tesis me ha proporcionado una muy grande experiencia tanto en un nivel profesional como en un nivel personal. He tenido la oportunidad de aplicar en este proyecto mis conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera y poder desarrollar de una manera más real el trabajo en equipo con mi asesor. También he adquirido habilidades de investigación, análisis de resultados e interpretación de gráficos que serán de gran utilidad para el área laboral.

A nivel personal, el desarrollo de esta tesis me ha enseñado la importancia del esfuerzo en cada uno de los temas vistos y la colaboración en la resolución de las problemáticas establecidas en un principio y así cumplir con cada uno de los objetivos planteados. Además, la satisfacción de la culminación de este documento, el cual, es aplicable actualmente y puede ser parte de futuras innovaciones aplicables al mismo y de mejoras continuas.

El desarrollo de esta tesis demuestra la factibilidad de la implementación del brazo manipulador para la recolección de granos de café en un área agrícola, generando numerosos beneficios ante esta actividad hecha tradicionalmente mediante con mano de obra de los trabajadores. Como profesional que esta aprendiendo constantemente, estoy agradecida por la experiencia adquirida al llevar a cabo y concluir satisfactoriamente esta tesis.

5.2 Conclusiones relativas a los objetivos específicos

El realizar cada uno de los objetivos específicos en el orden establecido permitió llegar de una manera correcta a la culminación de esta tesis, la visita al cafetalero de la región de Teziutlán permitió obtener las medidas y los datos específicos que

permitieron el diseño y la adaptación precisa de un dron, incluyendo las dimensiones de la plantación, espaciado entre plantas y características topográficas del diseño. El haber realizado el diseño y las simulaciones empleando herramientas CAD en base a los parámetros obtenidos en la visita al cafetalero permitió la elaboración de las piezas con medidas correctas y reales y así al someterlas bajo un estudio permitió que sus análisis de resultados fueran aceptables.

El desarrollo y la resolución del modelo cinemático considerando los movimientos que este realiza y sus grados de libertad permitieron la impresión de este prototipo utilizando la técnica de impresión 3D, ocupando como PLA como material.

5.3 Conclusiones relativas al objetivo general

La consecución del objetivo general de esta tesis, que consistió en desarrollar una propuesta de diseño de un brazo manipulador para la cosecha de granos de café mediante el empleo de herramientas de CAD, así como la realización del análisis cinemático, con la finalidad de construir un modelo a escala y funcional utilizando técnicas de manufactura aditiva, ha resultado en un logro significativo y valioso.

La utilización de herramientas avanzadas de diseño asistido por computadora, específicamente SolidWorks, ha posibilitado la creación de un diseño detallado y preciso del brazo manipulador, teniendo en cuenta los requisitos específicos y desafíos que hay en la cosecha de granos de café. El análisis cinemático llevado a cabo ha permitido comprender a fondo los movimientos y comportamientos del brazo manipulador en el contexto de la operación de cosecha, lo que ha facilitado ajustes y optimizaciones para mejorar su eficiencia y desempeño.

La aplicación de técnicas de manufactura aditiva en la construcción del modelo a escala ha demostrado ser una elección acertada, agilizando el proceso de materialización del diseño y proporcionando flexibilidad para realizar ajustes iterativos. Este enfoque no solo ha permitido la creación de un modelo funcional, sino que también sienta las bases para futuras iteraciones y mejoras en el diseño.

En última instancia, este trabajo de investigación no solo cumple con el propósito inicial de diseñar un brazo manipulador para la cosecha de granos de café, sino que también contribuye al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería agrícola y la robótica. Los resultados obtenidos y las metodologías aplicadas ofrecen perspectivas valiosas para la comunidad académica e industrial, destacando la importancia de la innovación y la integración de múltiples disciplinas en la resolución de desafíos específicos. Este proyecto representa, por lo tanto, un paso adelante en la búsqueda de soluciones tecnológicas eficientes y sostenibles para la automatización de procesos agrícolas, con aplicaciones potenciales más allá del ámbito de la cosecha de granos de café.

5.4 Limitaciones del modelo planteado

A pesar de los logros y perspectivas positivas asociadas a esta tesis, es importante reconocer ciertas limitantes que podrían afectar el alcance y generalización de los resultados. Algunas de estas limitantes incluyen:

- Material y Tecnología de Impresión 3D:

La creación del prototipo mediante impresión 3D utilizando filamento PLA como material podría presentar limitaciones en términos de resistencia y durabilidad, especialmente en entornos agrícolas exigentes. Se debe considerar la posibilidad de investigar y abordar las limitaciones de este material para asegurar la viabilidad a largo plazo del brazo manipulador en condiciones reales de cosecha.

- Ambiente Controlado en las Pruebas:

La realización de pruebas en un ambiente controlado puede no reflejar completamente las complejidades y variabilidades del entorno real de la cosecha de granos de café. Las condiciones controladas podrían no abordar desafíos como terrenos irregulares, variaciones climáticas extremas o la presencia de obstáculos imprevistos. Es esencial considerar la necesidad de pruebas adicionales en condiciones más realistas para evaluar plenamente el rendimiento del brazo manipulador.

- Generalización a Otros Cultivos o Entornos Agrícolas:

Los resultados obtenidos pueden ser específicos para la cosecha de granos de café y podrían no ser directamente extrapolables a otros cultivos o entornos agrícolas. Se recomienda precaución al generalizar los hallazgos y se sugiere que futuras investigaciones puedan explorar la adaptabilidad del diseño a diferentes contextos agrícolas.

- Consideraciones Ergonómicas y Eficiencia Operativa:

Aunque se aborda el diseño y análisis cinemático, es fundamental tener en cuenta las consideraciones ergonómicas para los operadores y evaluar la eficiencia operativa del brazo manipulador en términos de velocidad y precisión. Estos aspectos podrían requerir investigaciones y ajustes adicionales para optimizar la interacción entre la máquina y el operador.

Considerar y abordar estas limitaciones fortalecerá la validez y aplicabilidad de los resultados de la tesis, proporcionando una base más sólida para la implementación práctica del brazo manipulador en entornos agrícolas reales.

5.5 Recomendaciones

1. Refinamiento del Diseño:

Se sugiere llevar a cabo un análisis exhaustivo del diseño actual del brazo manipulador, evaluando la eficacia y la simplicidad estructural. La simplificación de la geometría puede facilitar la fabricación y reducir costos, sin comprometer la funcionalidad.

2. Iteraciones para Mejoras Continuas:

Implementar un enfoque iterativo en el proceso de diseño, incorporando retroalimentación de pruebas y análisis cinemático para realizar mejoras continuas. La retroalimentación de usuarios y operadores también puede proporcionar valiosas consideraciones a tener para la optimización del diseño.

3. Innovación Funcional:

Explorar innovaciones adicionales en la funcionalidad del brazo manipulador, como la integración de sistemas de visión avanzada para una mejor detección y clasificación de los granos. La adaptación a diferentes tamaños y formas de granos podría mejorar la versatilidad del sistema.

4. Investigación de Materiales Alternativos para Impresión 3D:

Realizar estudios sobre materiales alternativos para la impresión 3D que ofrezcan mayor resistencia y durabilidad, especialmente en entornos agrícolas desafiantes. La selección de materiales más robustos puede mitigar la degradación y aumentar la vida útil del prototipo.

5. Pruebas en Condiciones Realistas:

Extender las pruebas del brazo manipulador a entornos de cosecha de café más realistas, considerando la topografía del terreno, variaciones climáticas y la presencia de obstáculos. Esto proporcionará una evaluación más completa de su rendimiento en condiciones prácticas.

6. Mejora del Punto de Anclaje:

Investigar y desarrollar soluciones para mejorar el punto de anclaje en las vigas del brazo manipulador, con el objetivo de aumentar la resistencia y minimizar la deformación cuando se aplica fuerza. La optimización de esta área crítica contribuirá a la durabilidad y estabilidad del sistema.

CAPÍTULO VI COMPETENCIAS DESARROLLADAS

6.1 Competencias desarrolladas y/o aplicadas

Durante el desarrollo de la tesis “Propuesta de diseño y análisis cinemático de brazo manipulador para la recolección de granos de café” se han aplicado diversas competencias y habilidades.

6.1.1 Competencias genéricas

- Se identifica y se extrae información relevante de documentos científicos, literatura especializada y fuentes técnicas relacionadas con el diseño de brazos manipuladores y la recolección de granos de café, así como su capacidad para resumir de manera clara y concisa los conceptos fundamentales y las teorías que respaldan la investigación, integrando información de diversas fuentes y presentar una síntesis coherente y estructurada de los conocimientos adquiridos.
- Se presenta de manera clara y organizada la información abstraída y analizada usando de manera efectiva los gráficos, diagramas u otras representaciones visuales para mejorar la comprensión de los conceptos fundamentales.
- Se mejoran las habilidades de comunicación y coordinación con mi asesor de tesis, con el fin de llegar a cada uno de los objetivos planteados.
- Se lleva a cabo una investigación integral en el marco de la tesis, promoviendo la innovación y la aplicación práctica de conocimientos en el diseño de tecnologías robóticas para la mejora de procesos agrícolas, específicamente en la recolección de granos de café.
- Se identifica de manera clara y precisa los problemas y desafíos inherentes al diseño y análisis cinemático de un brazo manipulador para la recolección de granos de café, así como el reconocimiento de factores críticos que pueden afectar el rendimiento y eficiencia del sistema propuesto.
- Se plantean los problemas de manera estructurada, definiendo claramente los objetivos y restricciones asociadas al diseño del brazo manipulador.
- Se generan las alternativas de diseño y estrategias para superar los desafíos identificados.
- Consideración de múltiples enfoques y evaluación de sus ventajas y desventajas.
- Se evalúan los resultados obtenidos y la eficacia de las estrategias de resolución de problemas aplicadas.
- Se muestra la habilidad para utilizar las herramientas y funciones avanzadas proporcionadas por SolidWorks en el diseño y análisis cinemático de un brazo manipulador, así como las funcionalidades específicas de SolidWorks que faciliten el modelado, simulación y análisis cinemático en el contexto de la tesis.

- Uso de recursos de aprendizaje, tutoriales y documentación para ampliar su dominio sobre las capacidades del software.

6.1.2 Competencias específicas

- Conoce y aplica los diferentes tipos de coordenadas para la elaboración de un dibujo en el formato adecuado.
- Elabora dibujos mediante la utilización de comandos básicos de la herramienta computacional.
- Realiza la edición de dibujos aplicando los diferentes comandos de movimiento, copia, rotación, corte y extensión de entidades.
- Conoce y realiza dibujos que contengan dentro de su geometría perfiles y chaflanes para realizar su acotación y cambio de escala.
- Aplica las diferentes relaciones cinemáticas de Grüebler y Grashoff para comprender el funcionamiento de un mecanismo y determinar sus grados de libertad.
- Analiza mecanismos planos para la determinación de la posición, velocidad y aceleración empleando diferentes métodos y con la aplicación de software.
- Diseña el perfil de los dientes de engranes en forma gráfica, analítica y mediante la aplicación de software.
- Diseña mecanismos de cuatro barras articuladas que generen un movimiento deseado, mediante la síntesis de mecanismos.
- Identifica los componentes de un robot industrial para determinar de los grados de libertad y espacio de trabajo de dicho manipulador las disciplinas que intervienen en su análisis y diseño.
- Manipula un robot industrial en forma manual a través de sus diversos sistemas de referencia para ubicar la herramienta de trabajo en puntos de interés.
- Realizar análisis cinemáticos a robots industriales para la obtención de los modelos matemáticos que definen la ubicación espacial, la velocidad y la trayectoria del órgano terminal.
- Conoce el principio del método de elemento finito como herramienta para la solución de problemas de ingeniería.
- Conoce las relaciones esfuerzo-deformación unitaria y deformación unitaria-desplazamiento para desarrollar el método del elemento finito para un problema unidimensional.
- Conoce y analiza armaduras estructurales por medio del elemento finito para proporcionar las deflexiones de los nudos, los efectos de temperatura y el asentamiento de soportes.
- Conoce la formulación del elemento finito para vigas con el fin de aplicar y resolver problemas de marcos bidimensionales.
- Explica los conceptos relacionados con el estudio del efecto interno de elementos mecánicos o estructurales sometidos a cargas estáticas para determinar reacciones internas, esfuerzos y tipos de esfuerzos,

deformaciones y tipos de deformaciones, y propiedades mecánicas de los materiales.

- Calcula y explica los esfuerzos y deformaciones de elementos mecánicos sometidos a carga axial y cortante para determinar los materiales y geometrías de dichos elementos.
- Analiza y evalúa los esfuerzos y deflexiones en vigas sometidas a cargas sometidas a cargas en el plano de simetría para seleccionar el perfil más adecuado.
- Analiza y evalúa los esfuerzos resultantes en elementos mecánicos sometidos a cargas combinadas, para determinar mediante criterios de falla la resistencia del elemento y su factor de seguridad.

CAPÍTULO VII FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliografía

- Barrientos, A. (2007). Fundamentos de Robótica. Madrid: Mc GrawHill.
- Benimeli, F. (2005). Estimación de parámetros dinámicos en robots manipuladores. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Craig, J. J. (2005). "Introduction to robotics: mechanics and control". New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Craig, J. J. (2006). Robótica. México: Prentice Hall.
- Cursos Baristas Café. (27 de Septiembre de 2022). Obtenido de Cursos Baristas Café: <https://cursosbaristacafe.com.mx/blog/cafe-de-puebla/>
- Ferraté, G., & otros, y. (1986). Robotica Industrial. México: Marcombo.
- G. Budynas, R. (2015). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mexico: Mc Graw Hill.
- Íñigo Madrigal, R. (2004). Robots industriales manipuladores. México: Alfaomega.
- M. Gere, J. (2008). Mecánica de materiales. Mexico: Thomson.
- México, G. d. (24 de Agosto de 2023). SAGARPA. Obtenido de SAGARPA: <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-alcanza-el-3er-lugar-a-nivel-nacional-del-valor-de-produccion-de-cafe?idiom=es>
- Miranda Colorado, R. (2016). Cinemática y dnámica de robots manipuladores. Mexico: Alfaomega.
- Ollero Baturone, A. (2001). Robotica manipuladores y robots móviles. España: Macrombo.
- Ollero, A. (2001). Robótica, Manipuladores y robots móviles. Barcelona: Marcombo.
- P. Beer, F. (2007). Mecánica Vectorial para ingenieros. Mexico: Mc Graw Hill.
- Reyes, F. (2012). Matlab aplicado a robótica y mecatrónica. Mexico: AlfaOmega.
- Russell, S. J. (2016). Inteligencia artificial: un enfoque moderno. Madrid: Pearson Educación.
- Satista. (24 de Agosto de 2023). Obtenido de Satista: <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>

- Siciliano, B. &. ((eds.) 2008). Springer Handbook of Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Solar, J. R. (2018). Introducción a la robótica. En J. R. Solar, & R. Salazar, Introducción a la robótica (pág. 20).
- Spong, M. W., & Vidyasagar, M. (1989). Robot Dynamics and Control. John Wiley & Sons.
- Zuleima, J. (2019). Caracterización mecánica de piezas de ácido poliláctico, policaprolactona y Lay-Fomm 40 fabricadas por modelado de deposición fundida, en función de los parámetros de impresión. ITECKNE.

CAPÍTULO VIII ANEXOS

Anexo A. Componentes del brazo recolector

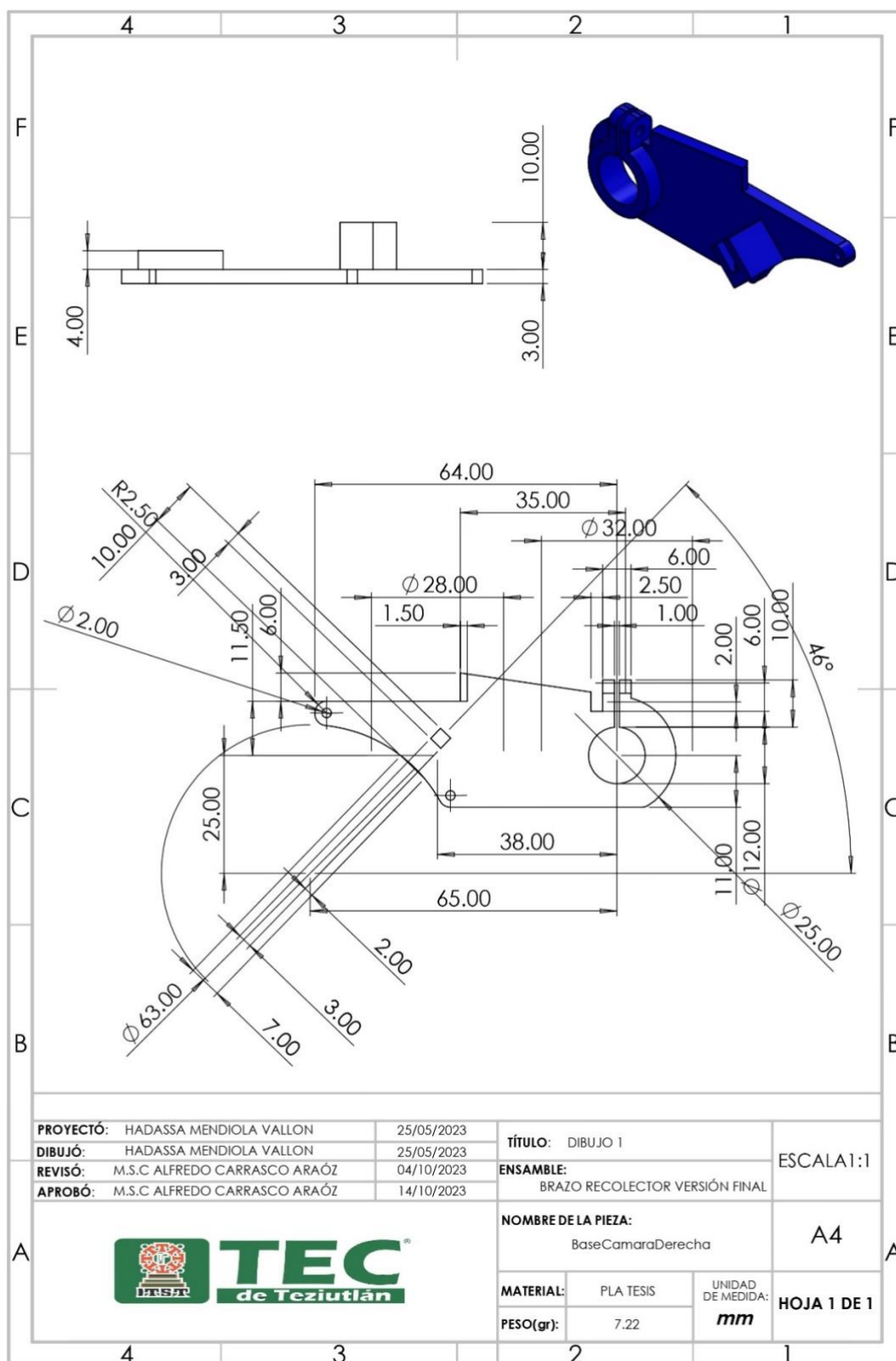


Figura 67. Dibujo en SolidWorks "Base cámara derecha". Autor propio

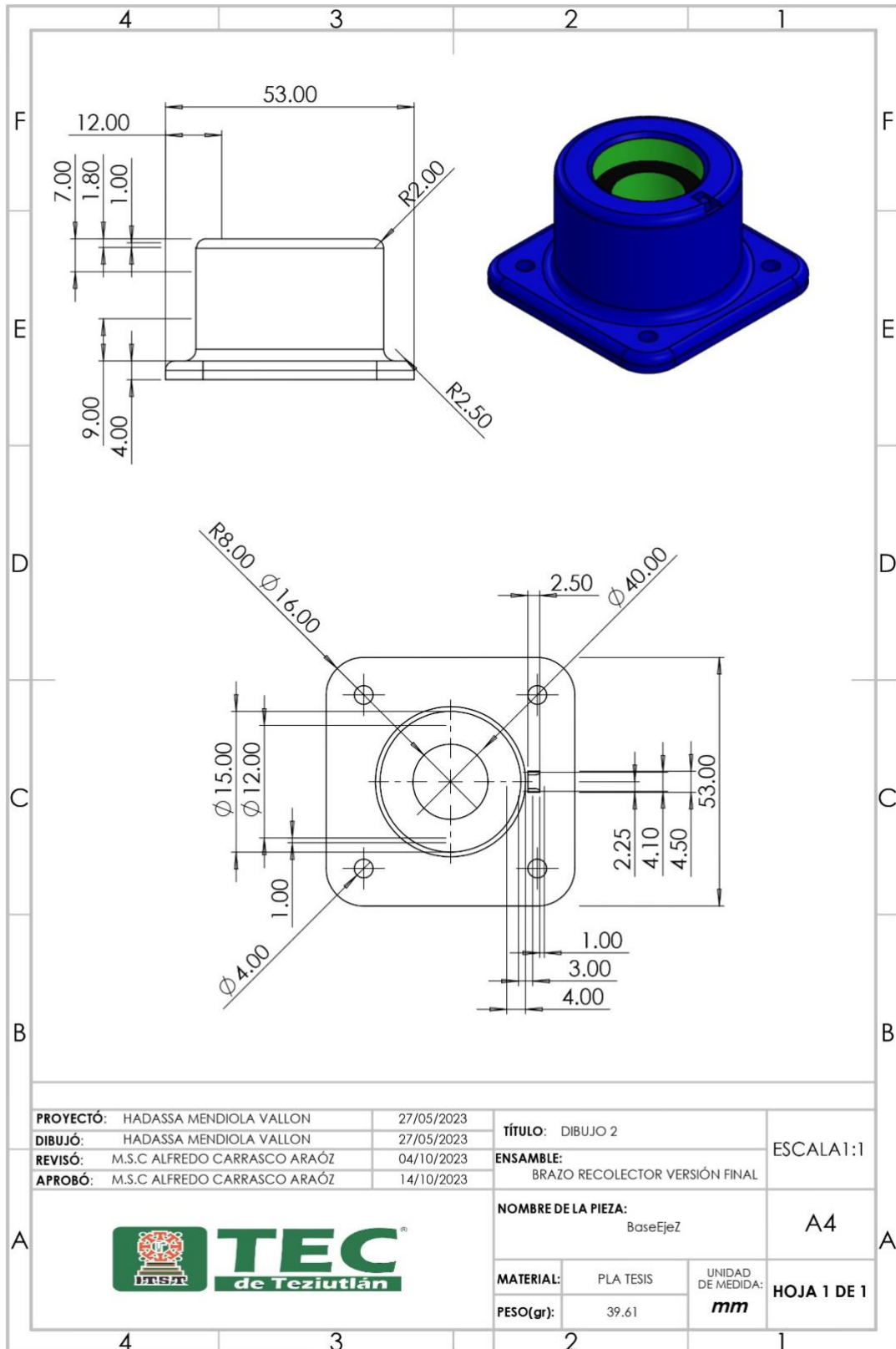


Figura 68. Dibujo en SolidWorks "Base Eje Z". Autor propio

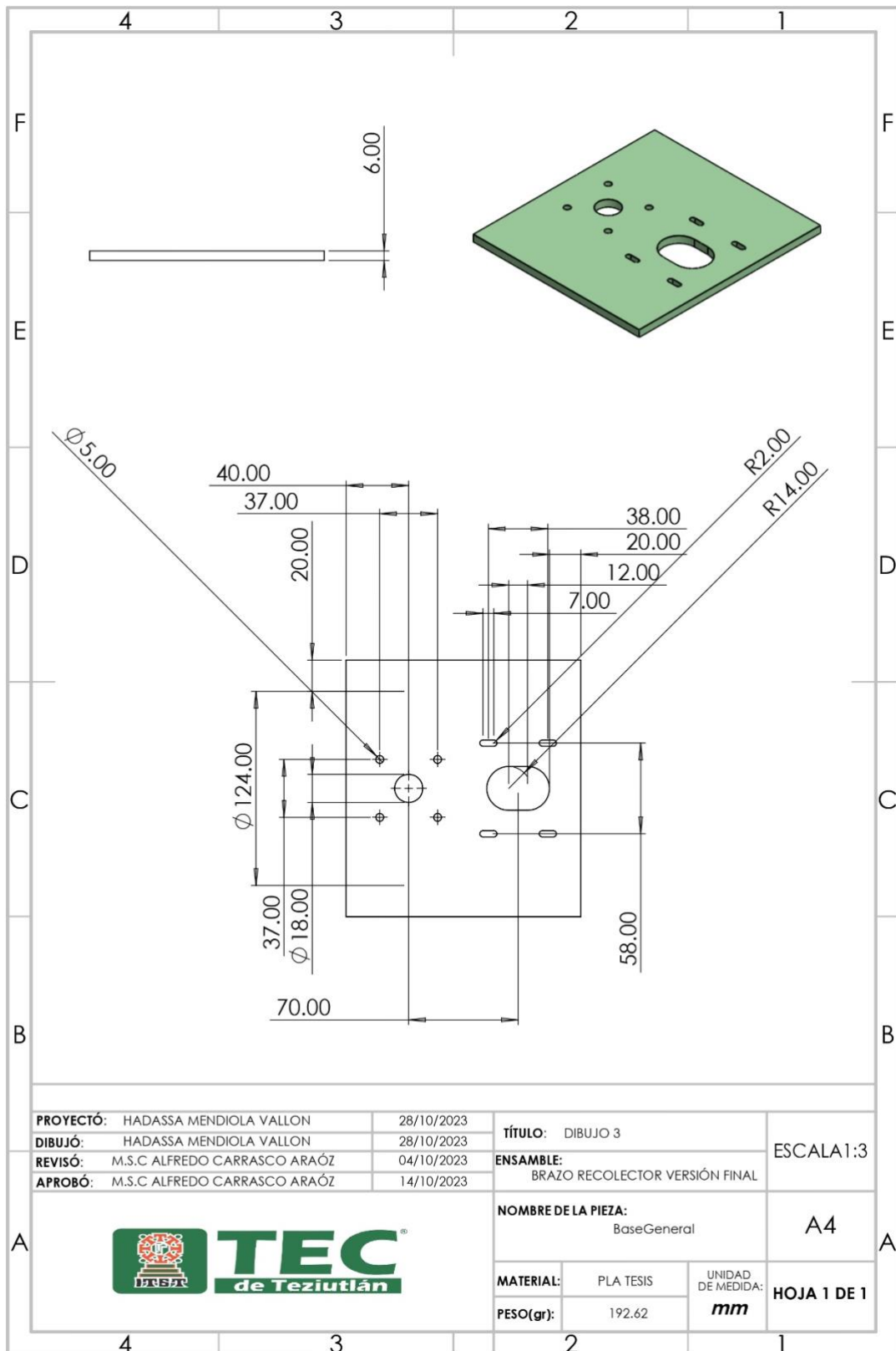


Figura 69. Dibujo en SolidWorks "Base General". Autor propio

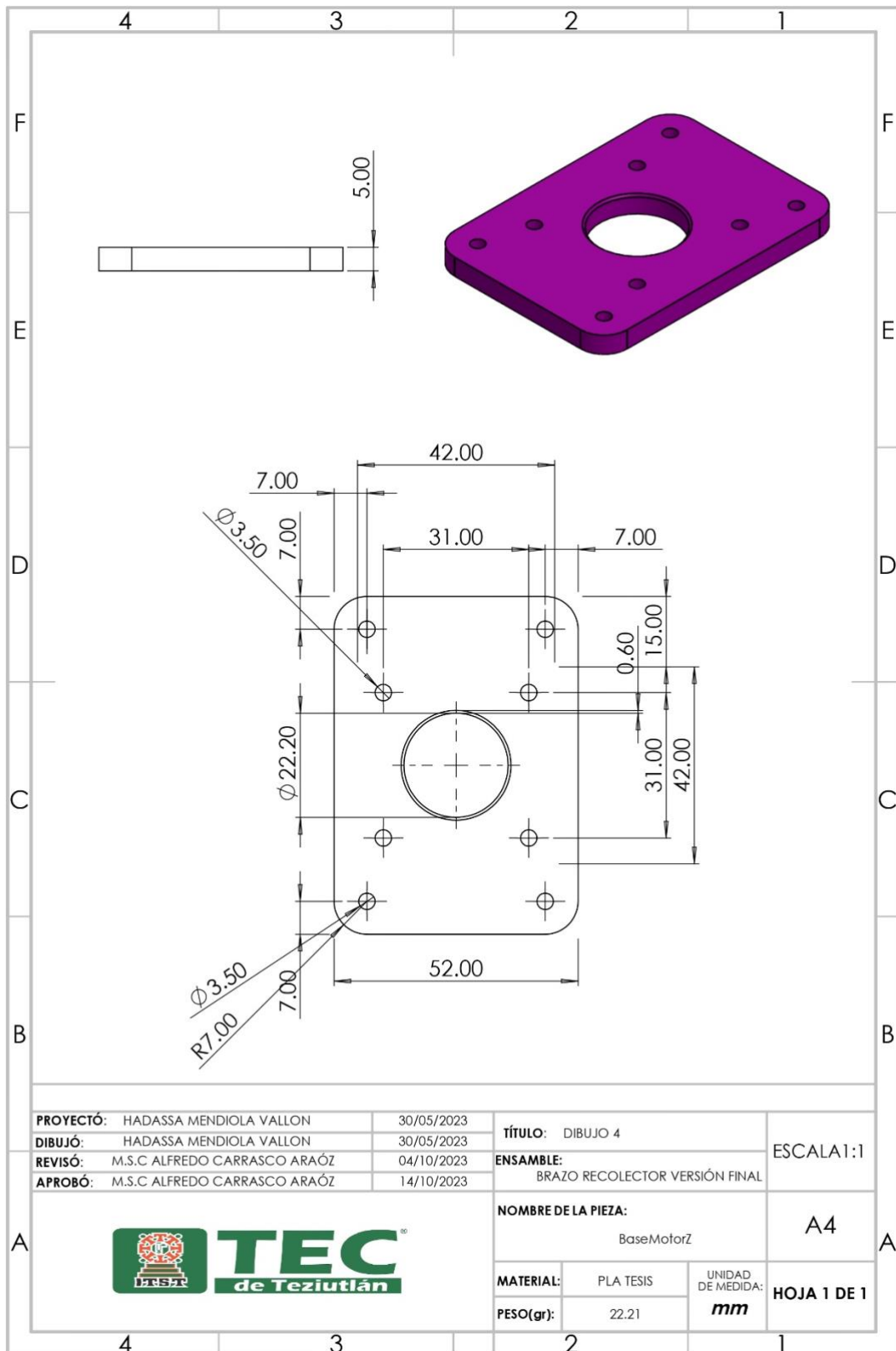


Figura 70. Dibujo en SolidWorks "Base Motor Z". Autor propio

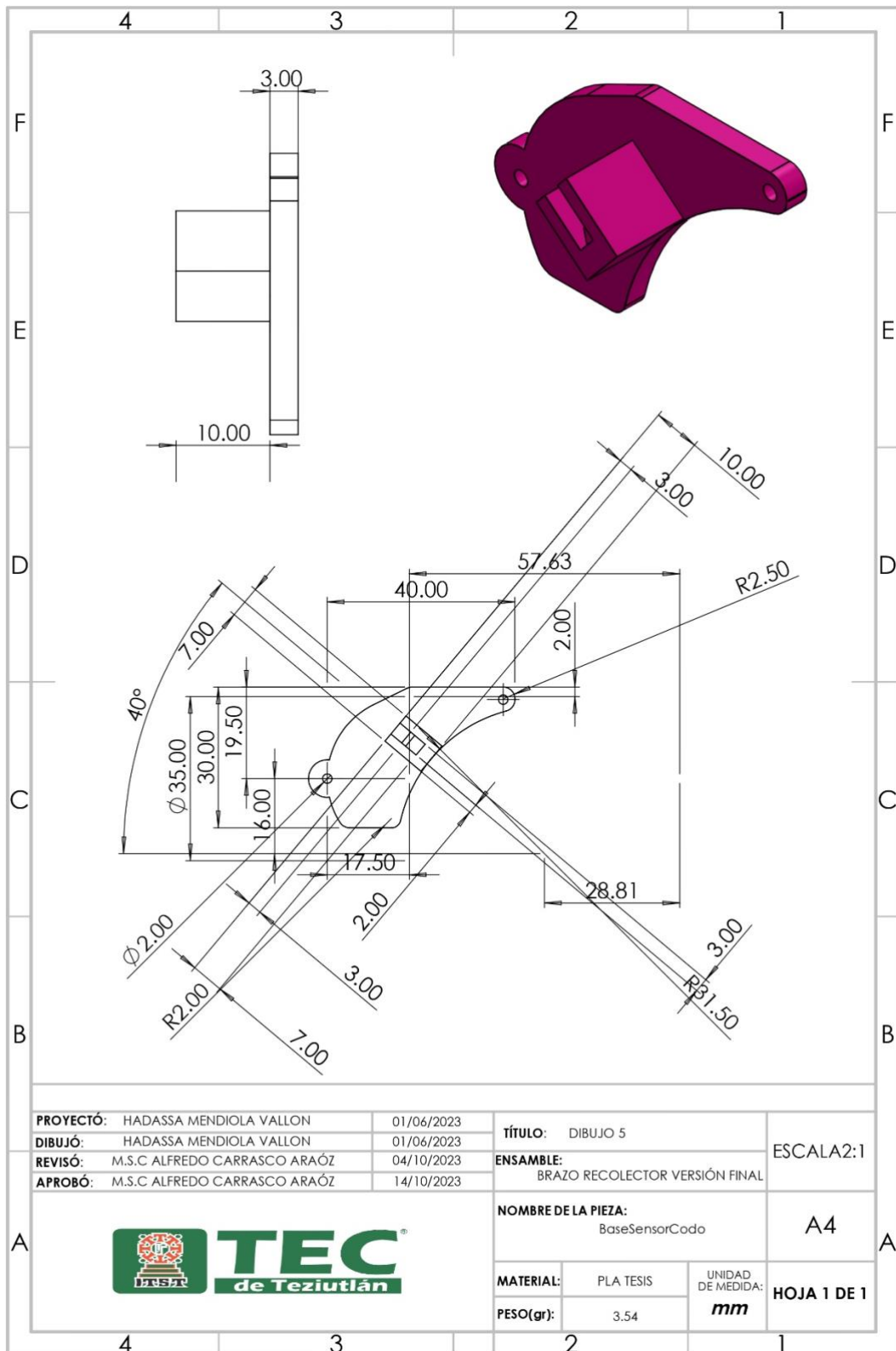


Figura 71. Dibujo en SolidWorks "Base Sensor Codo". Autor propio

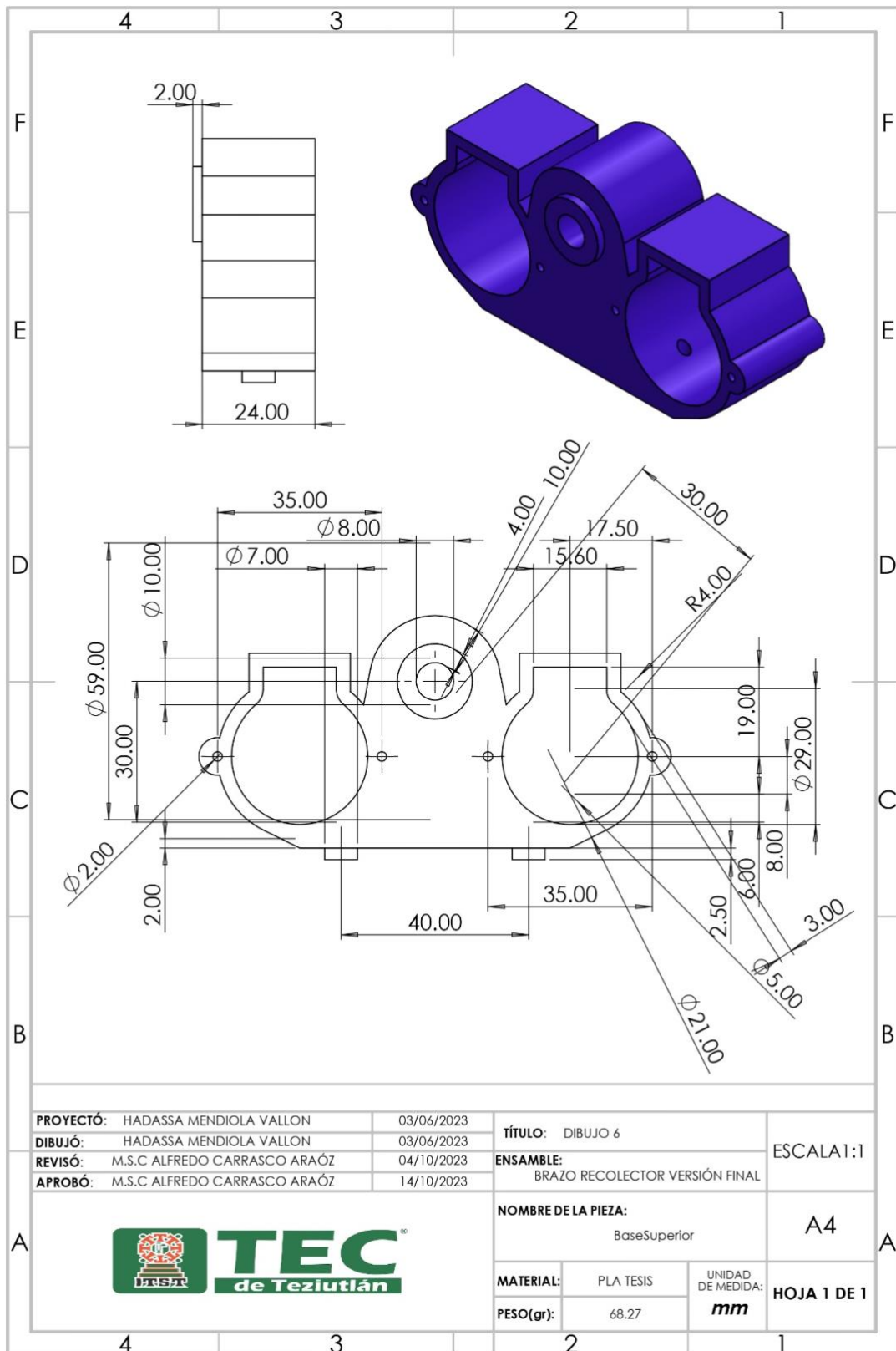


Figura 72. Dibujo en SolidWorks "Base Superior". Autor propio

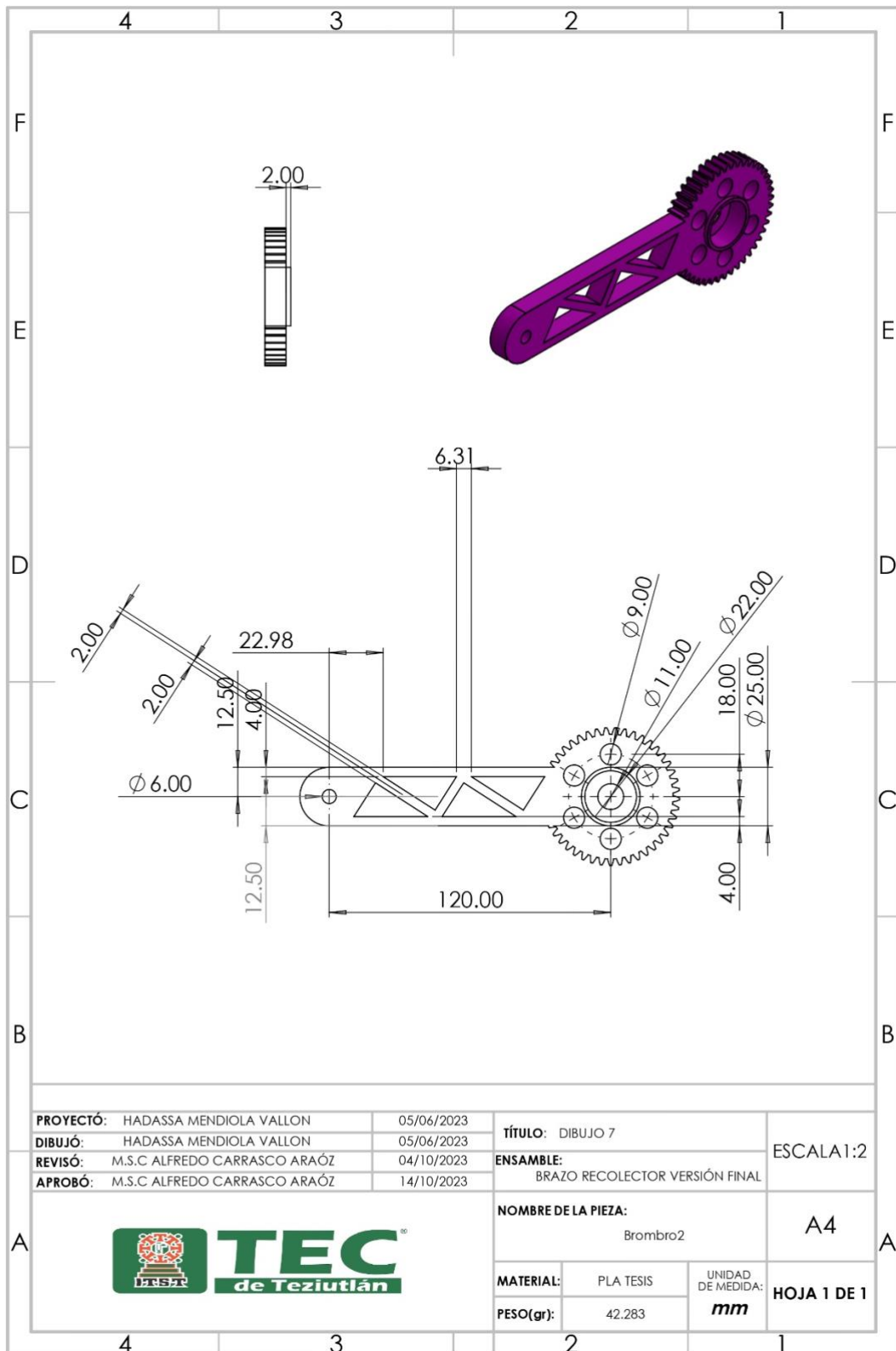


Figura 73. Dibujo en SolidWorks "Brombro2". Autor propio

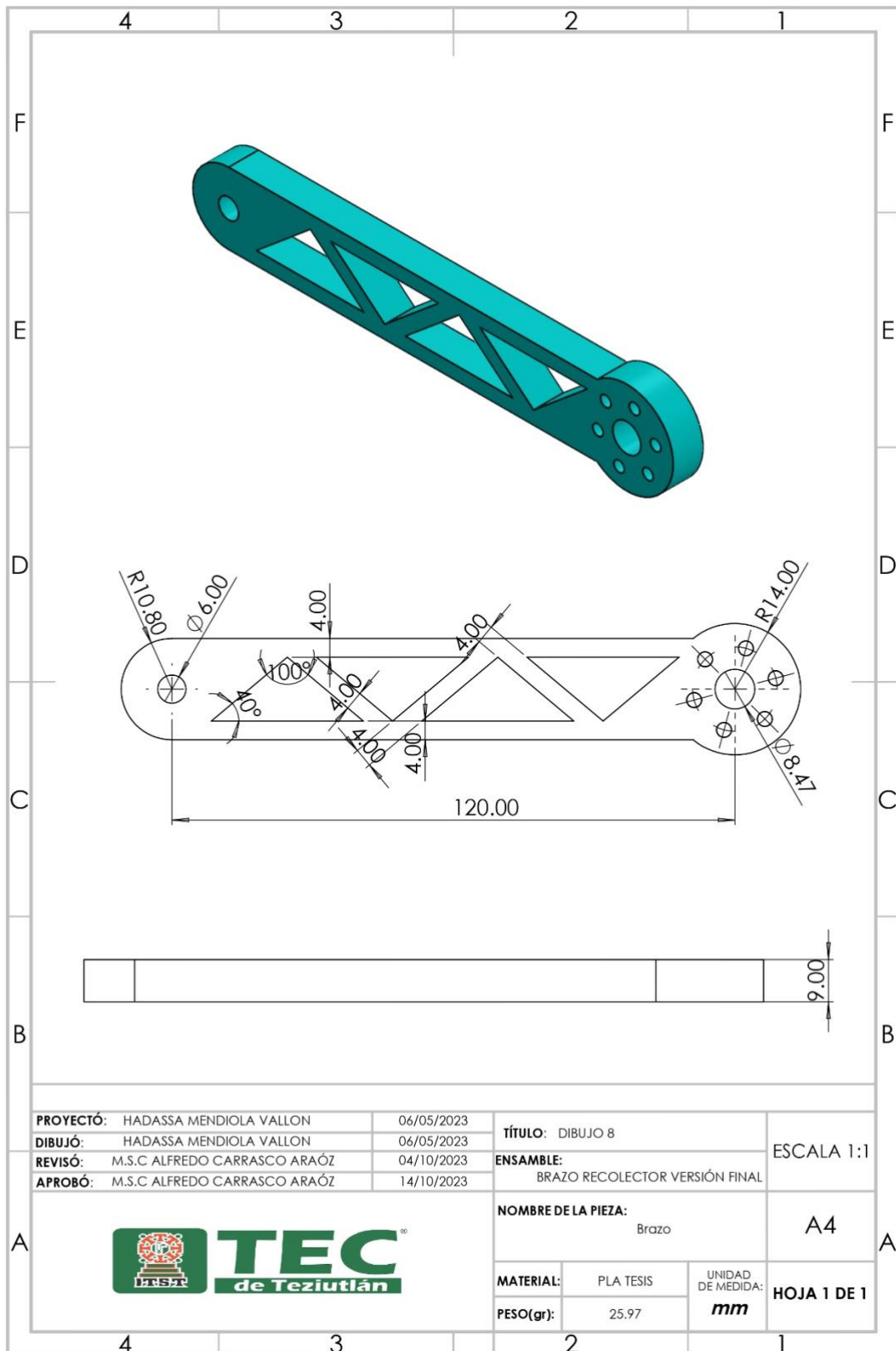


Figura 74. Dibujo en SolidWorks "Brazo". Autor propio

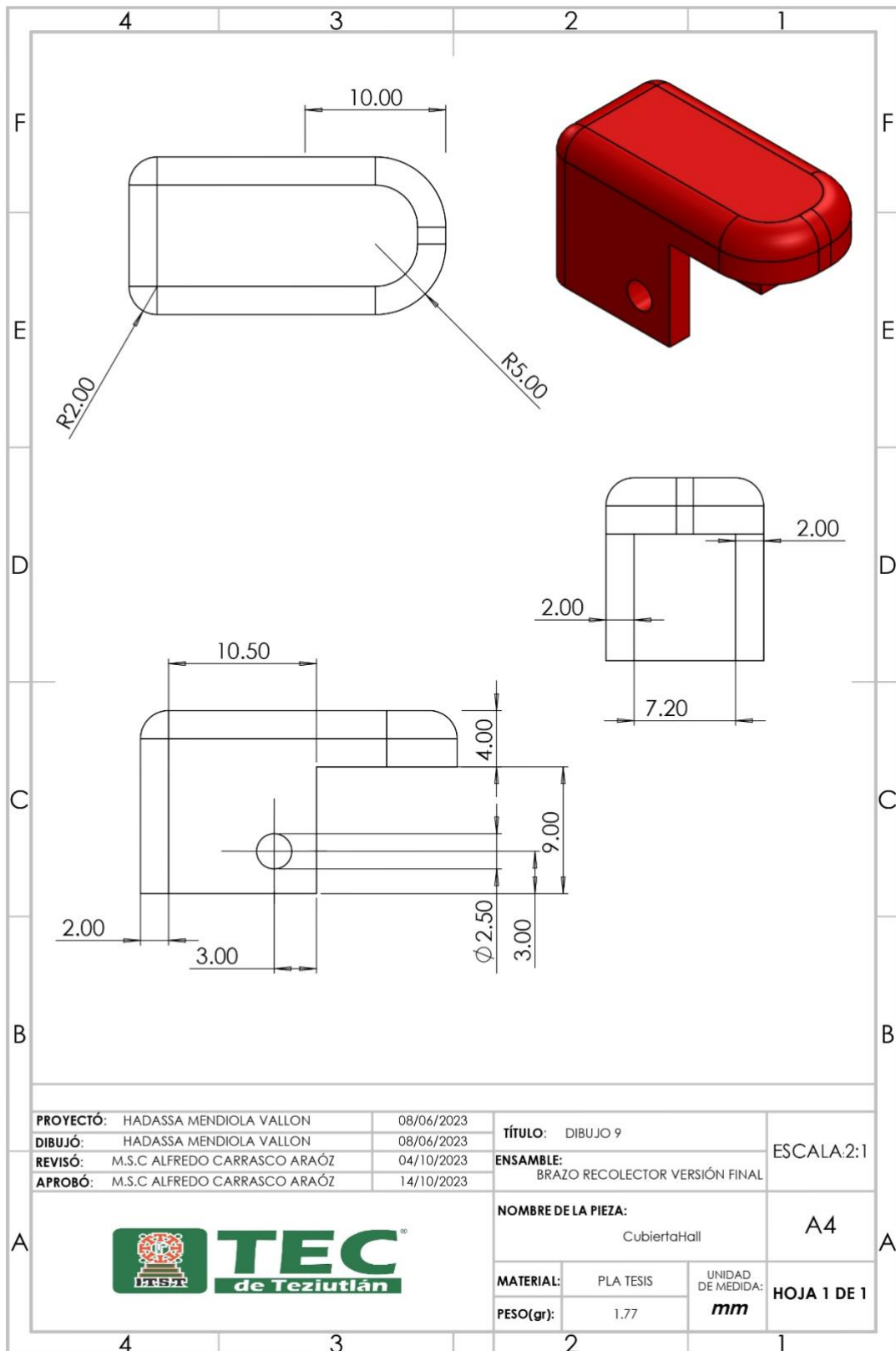


Figura 75. Dibujo en SolidWorks "Cubierta Hall". Autor propio

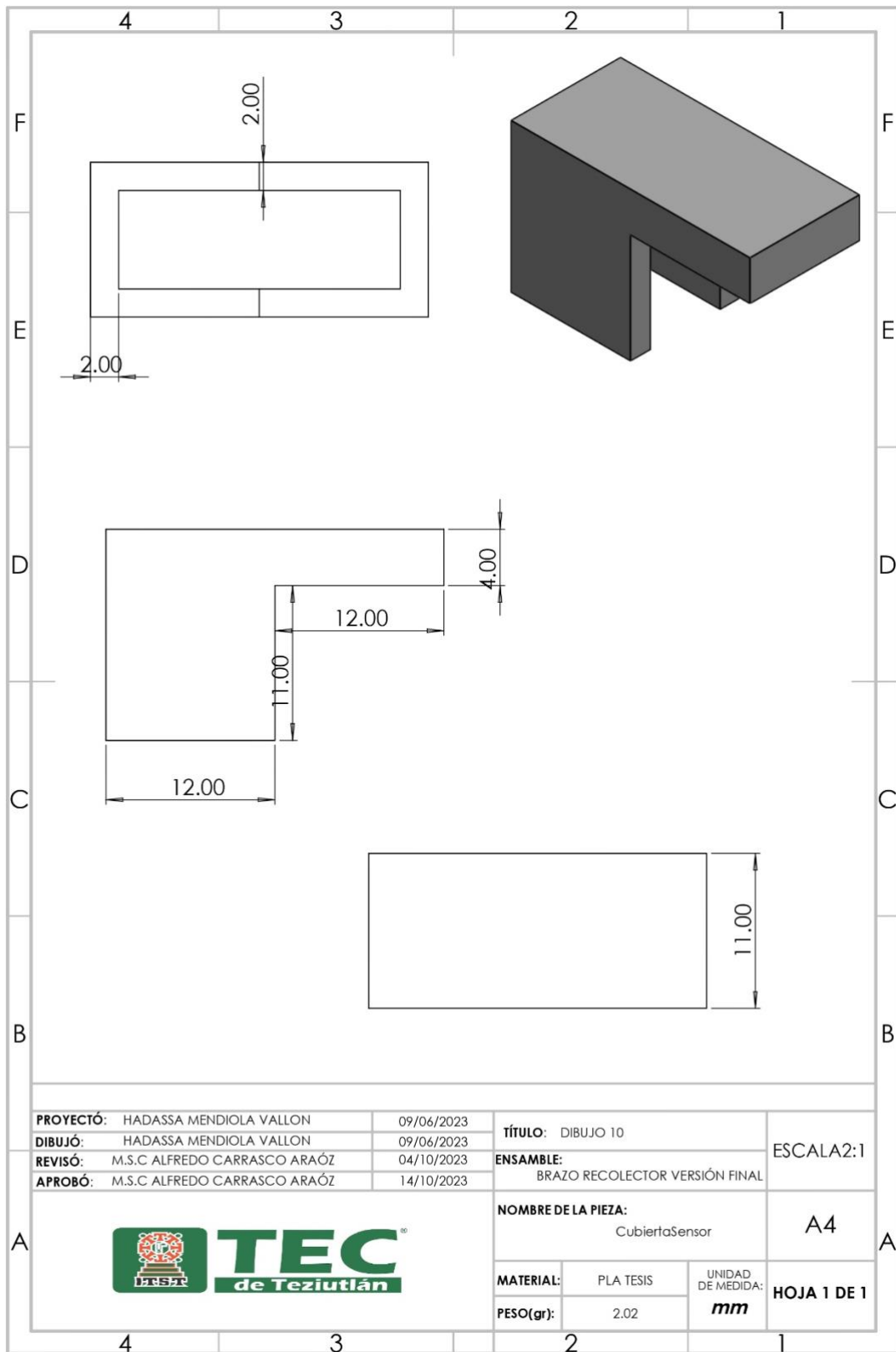


Figura 76. Dibujo en SolidWorks "Cubierta Sensor". Autor propio

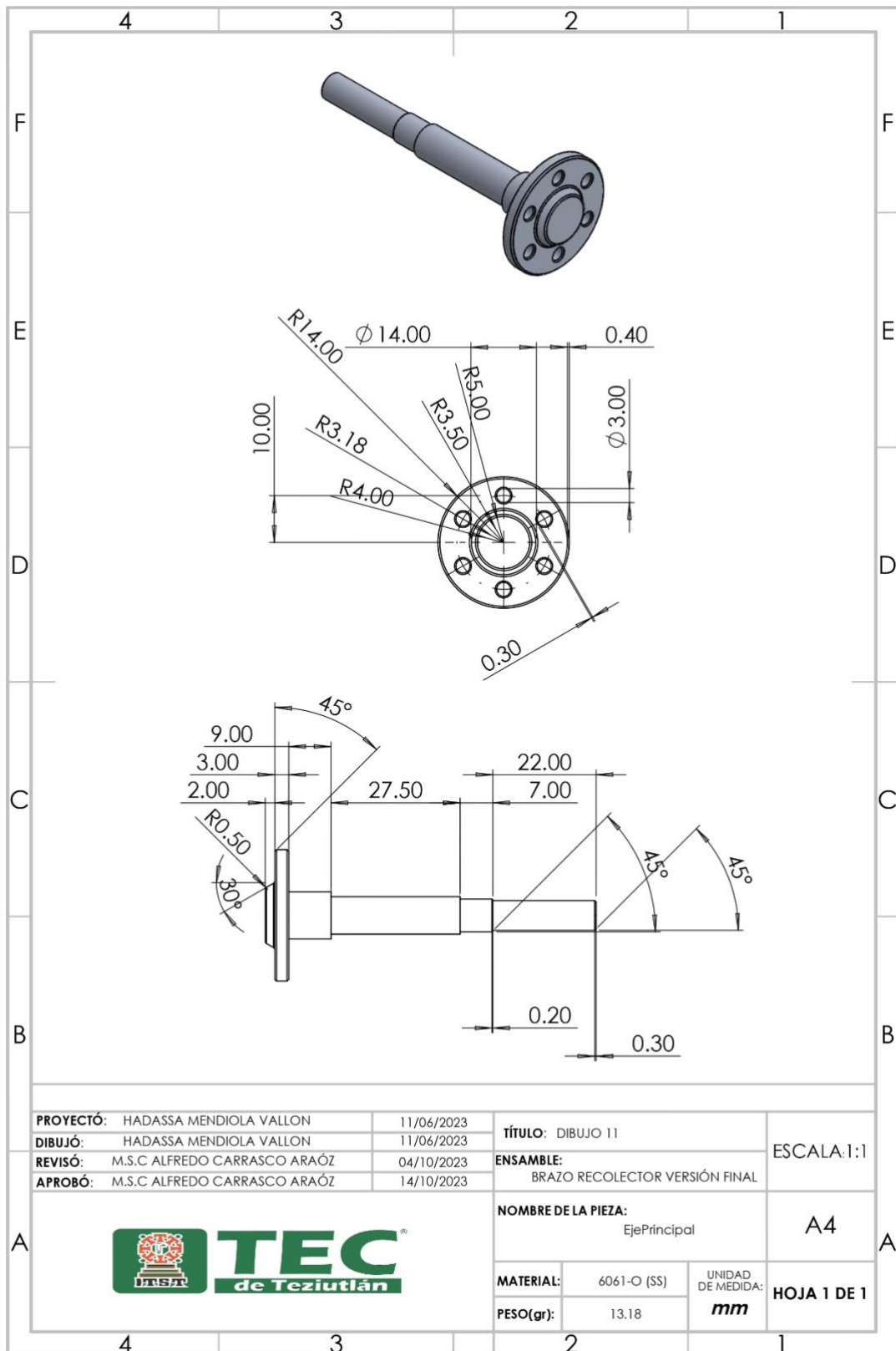


Figura 77. Dibujo en SolidWorks "Eje Principal". Autor propio

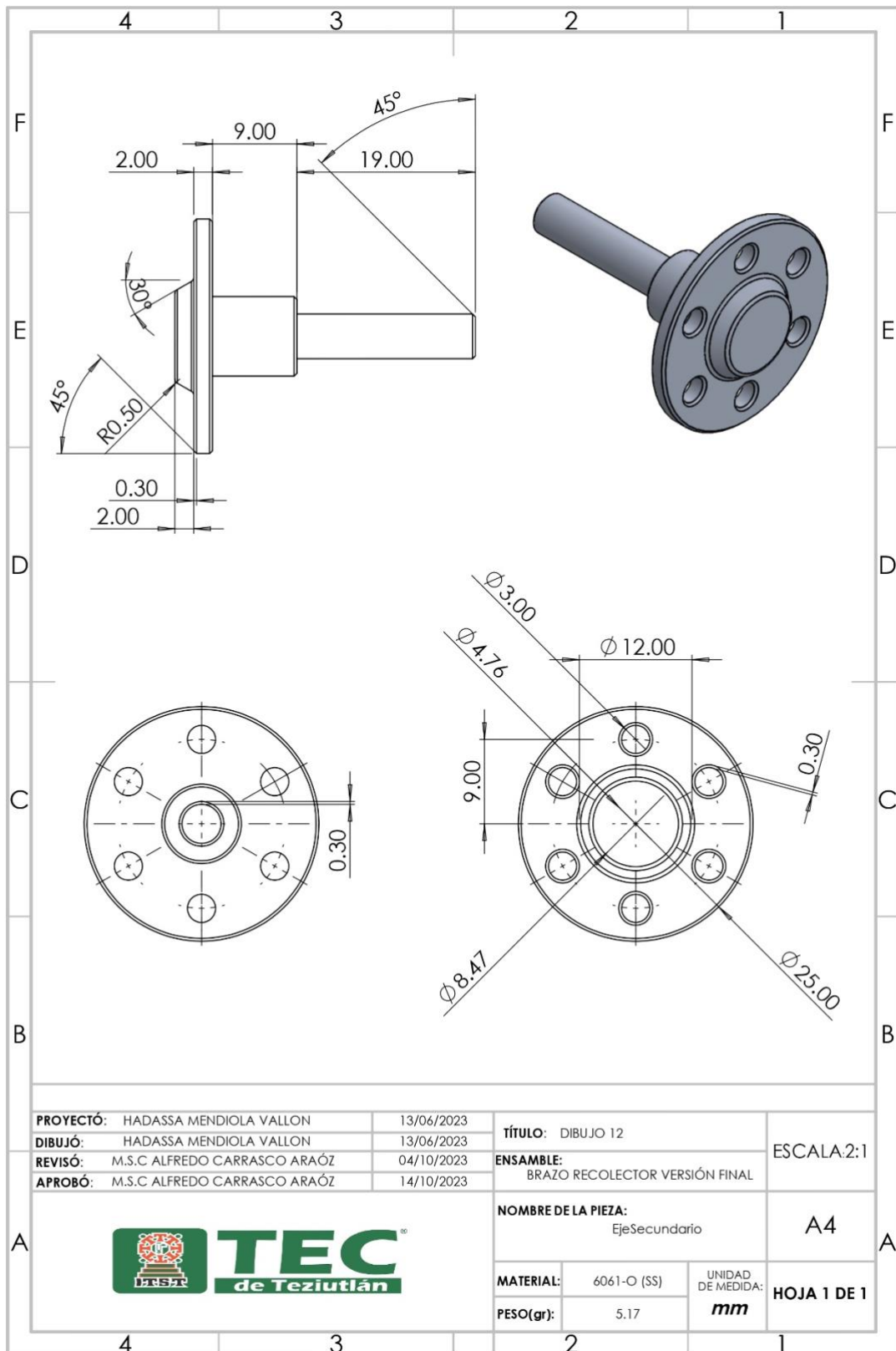


Figura 78. Dibujo en SolidWorks "Eje Secundario". Autor propio

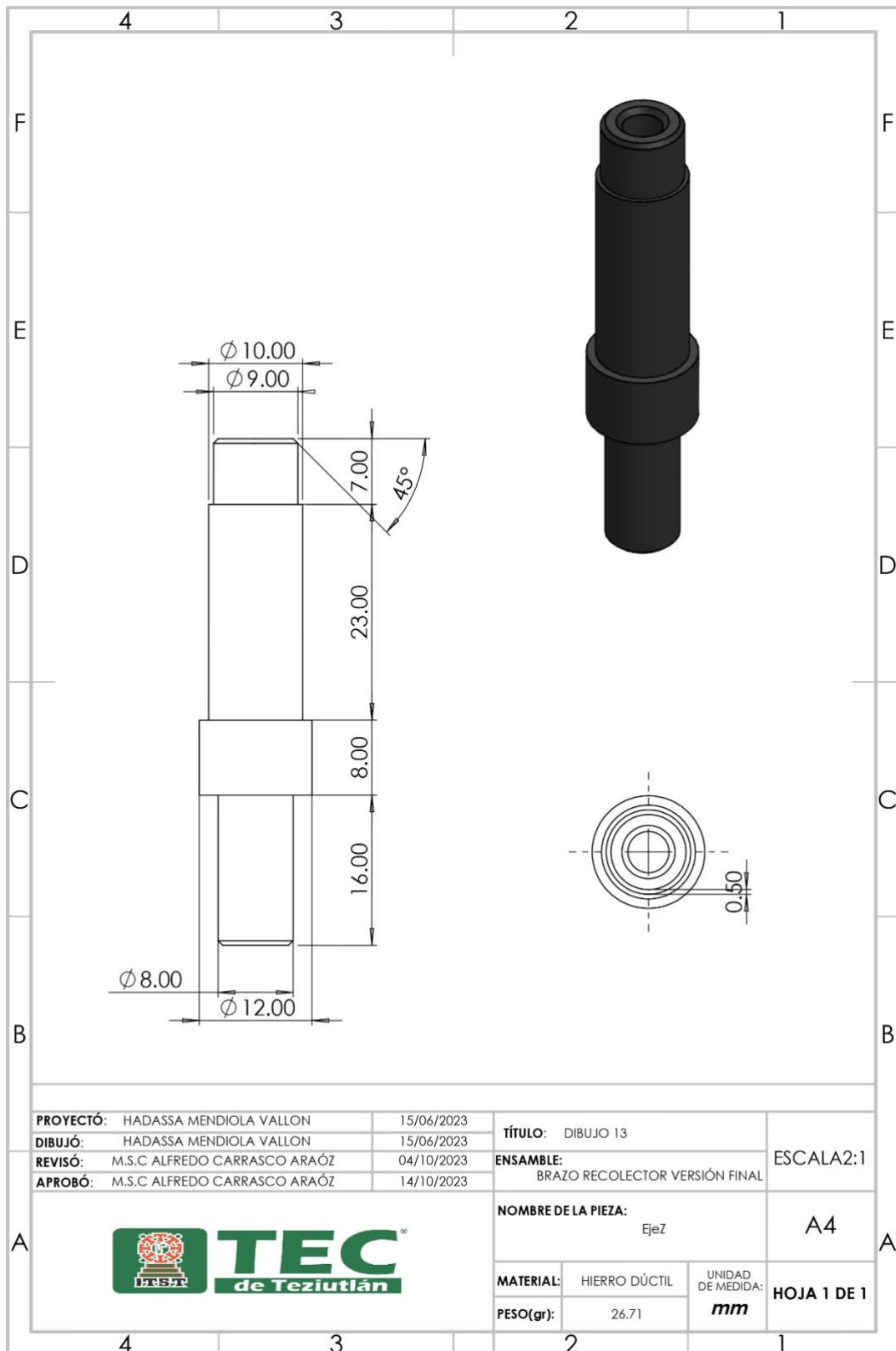


Figura 79. Dibujo en SolidWorks "Eje Z". Autor propio

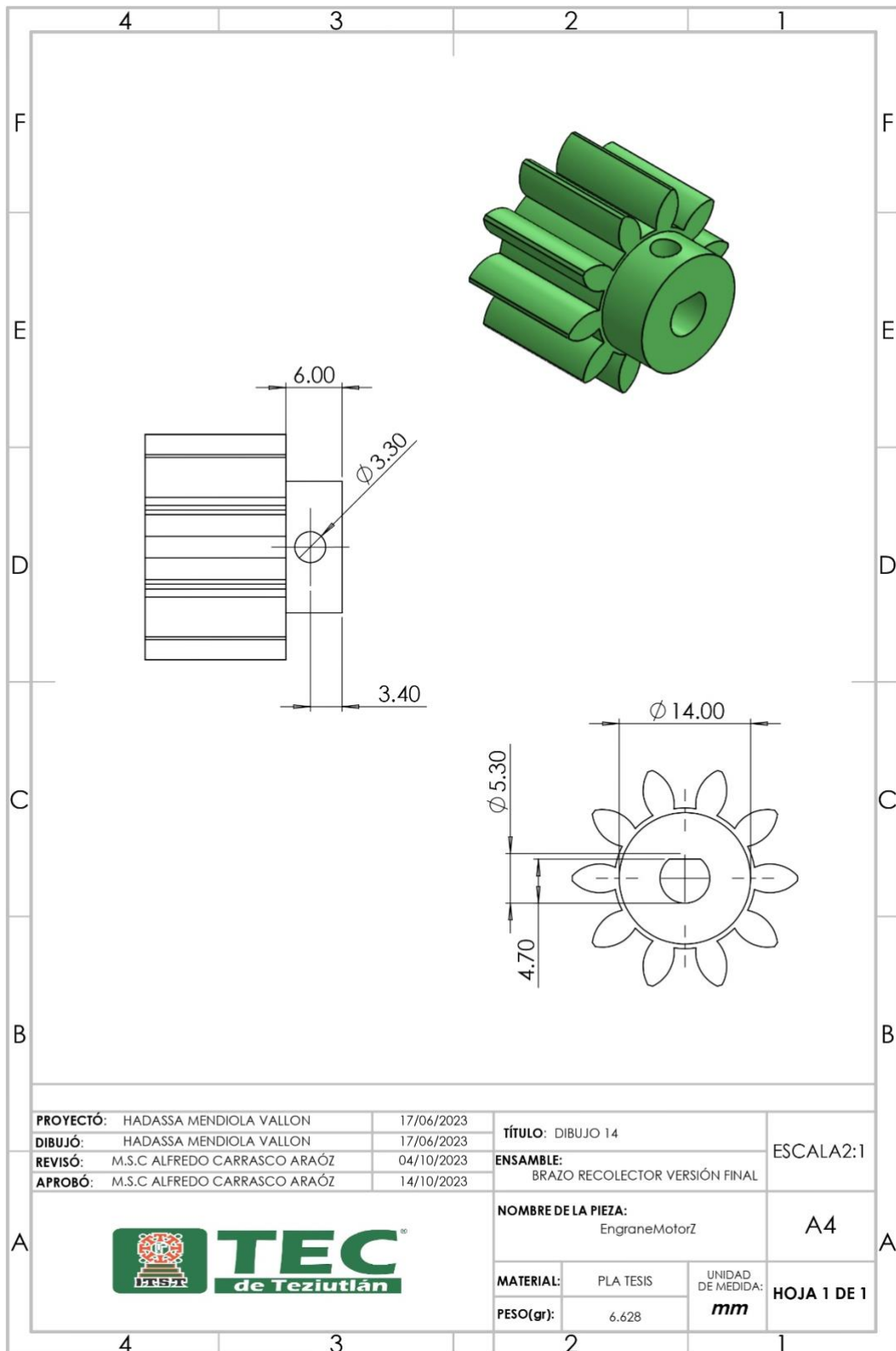


Figura 80. Dibujo en SolidWorks "Engrane Motor Z". Autor propio

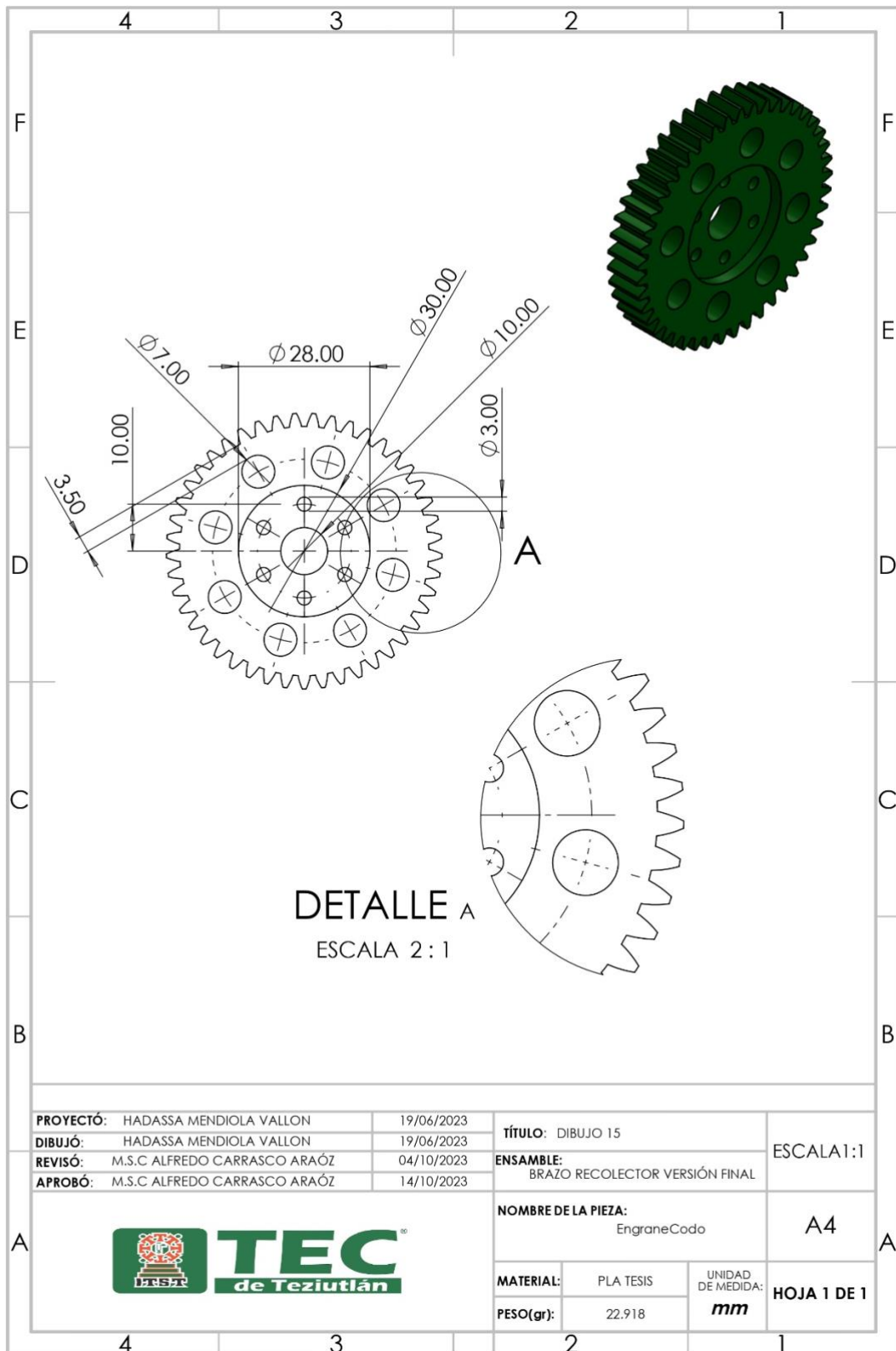


Figura 81. Dibujo en SolidWorks "Engrane Codo". Autor propio

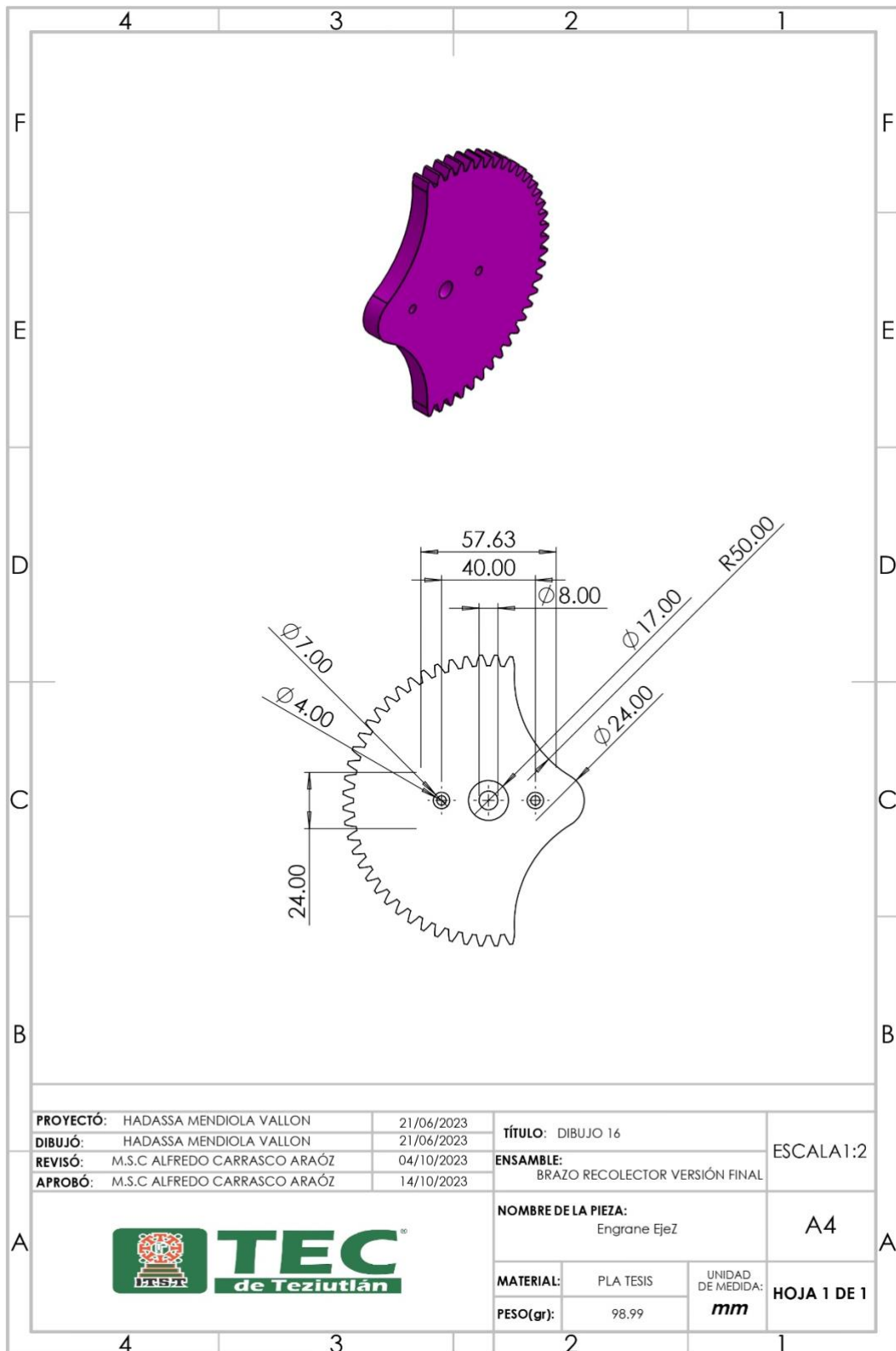


Figura 82. Dibujo en SolidWorks "Engrane Eje Z". Autor propio

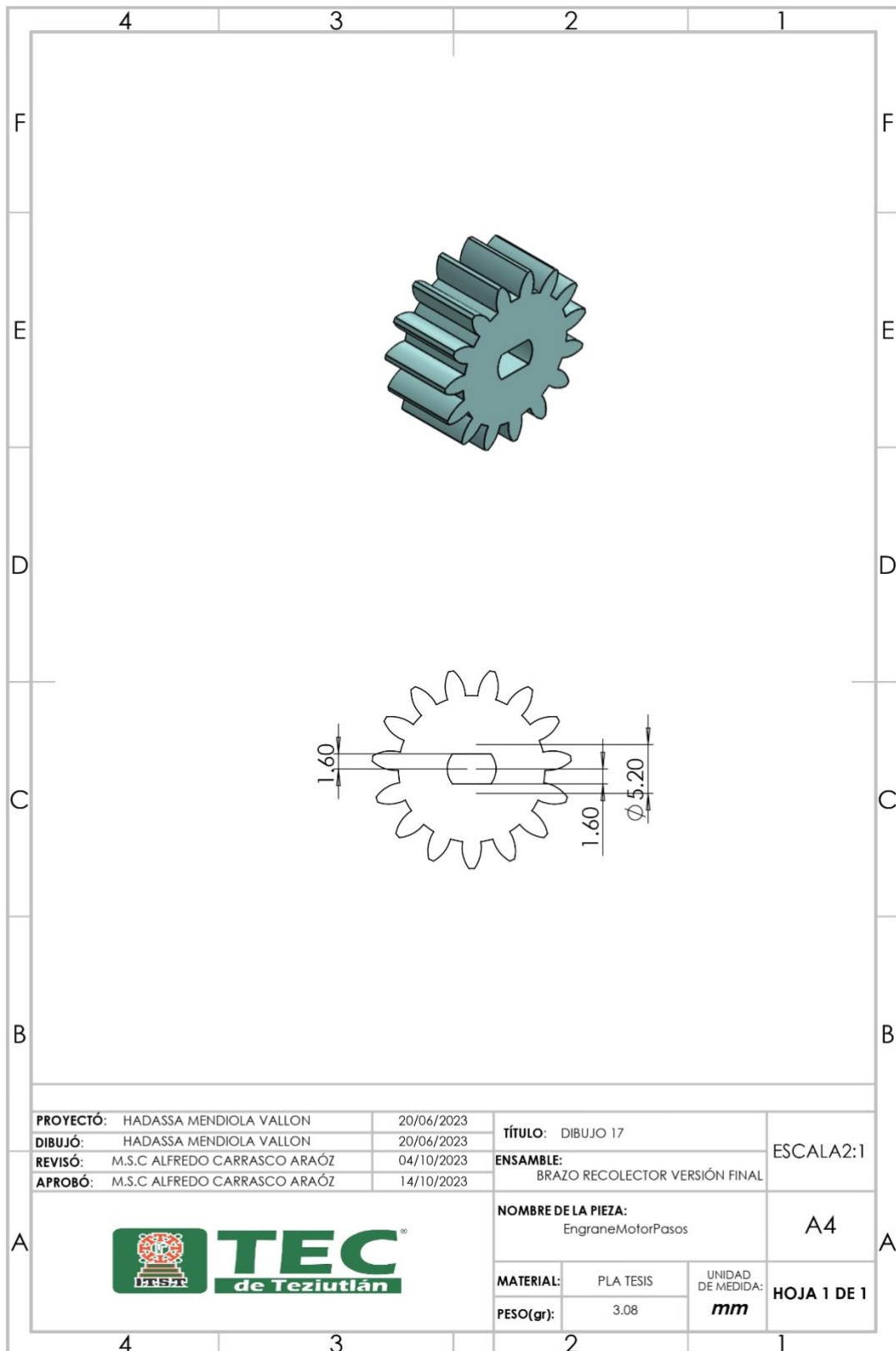


Figura 83. Dibujo en SolidWorks "Engrane Motor a Pasos". Autor propio

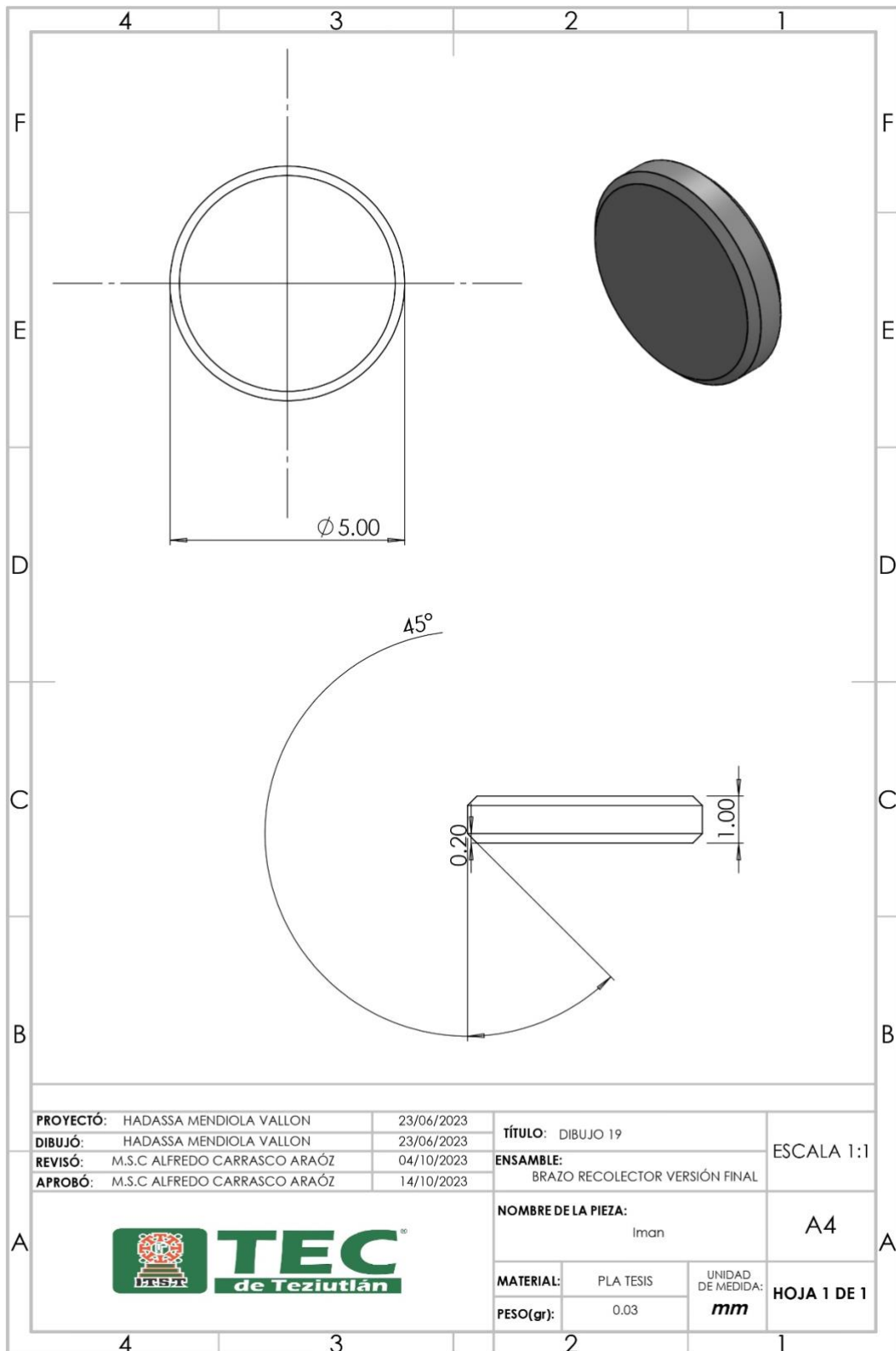


Figura 84. Dibujo en SolidWorks "Imán". Autor propio

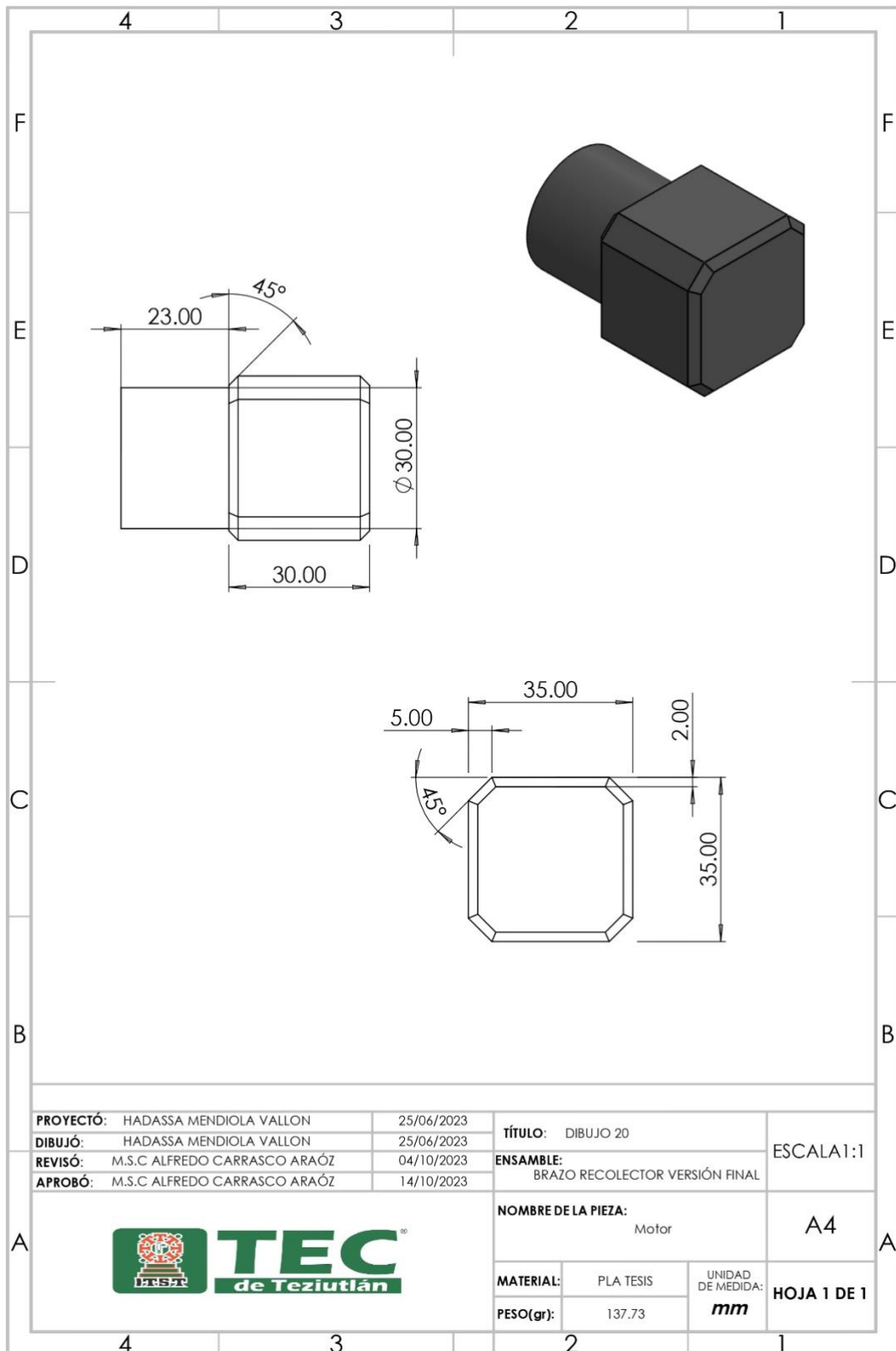


Figura 85. Dibujo en SolidWorks "Motor". Autor propio

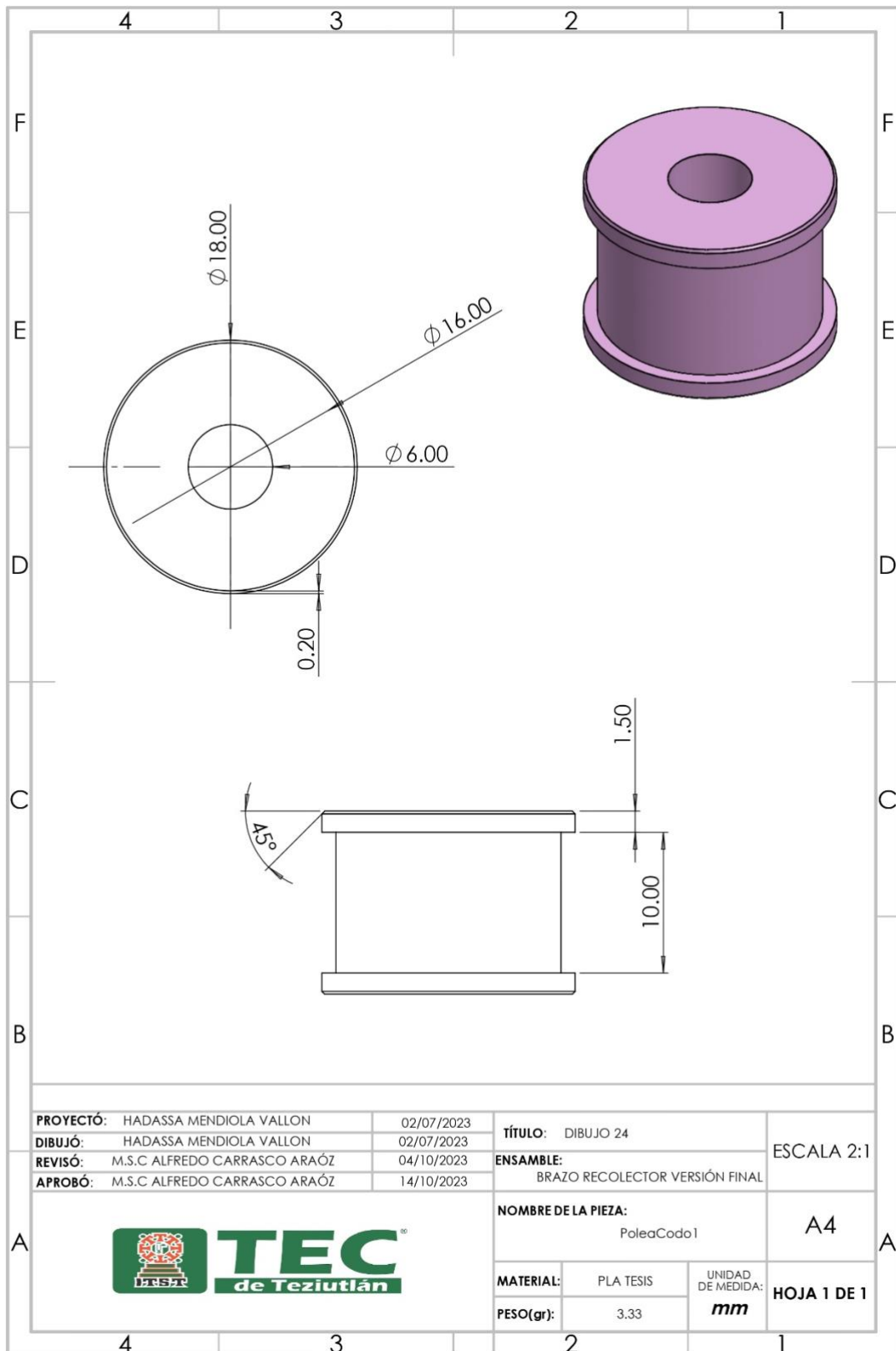


Figura 86. Dibujo en SolidWorks "Polea Codo 1". Autor propio

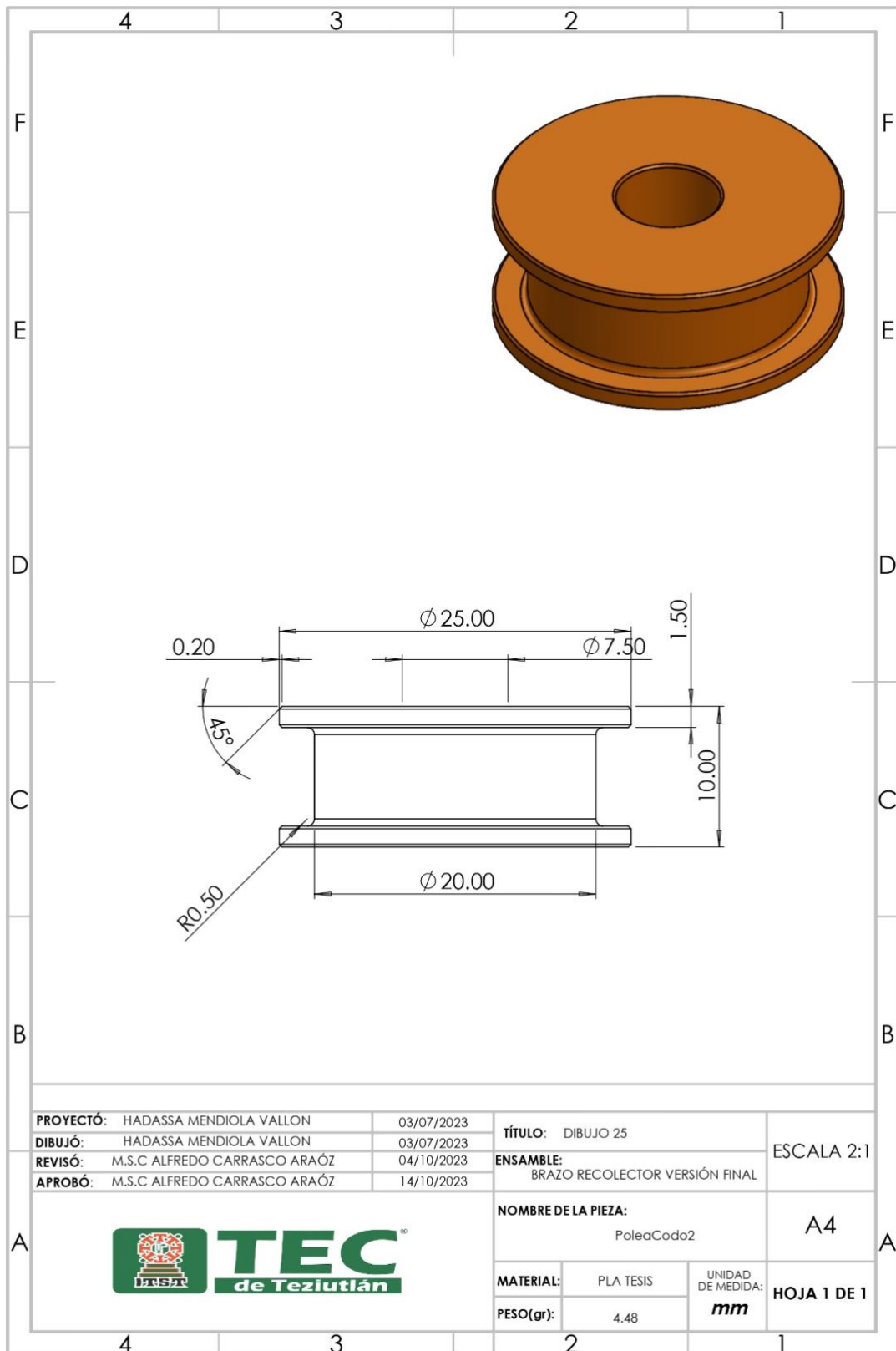


Figura 87. Dibujo en SolidWorks "Polea Codo 2". Autor propio

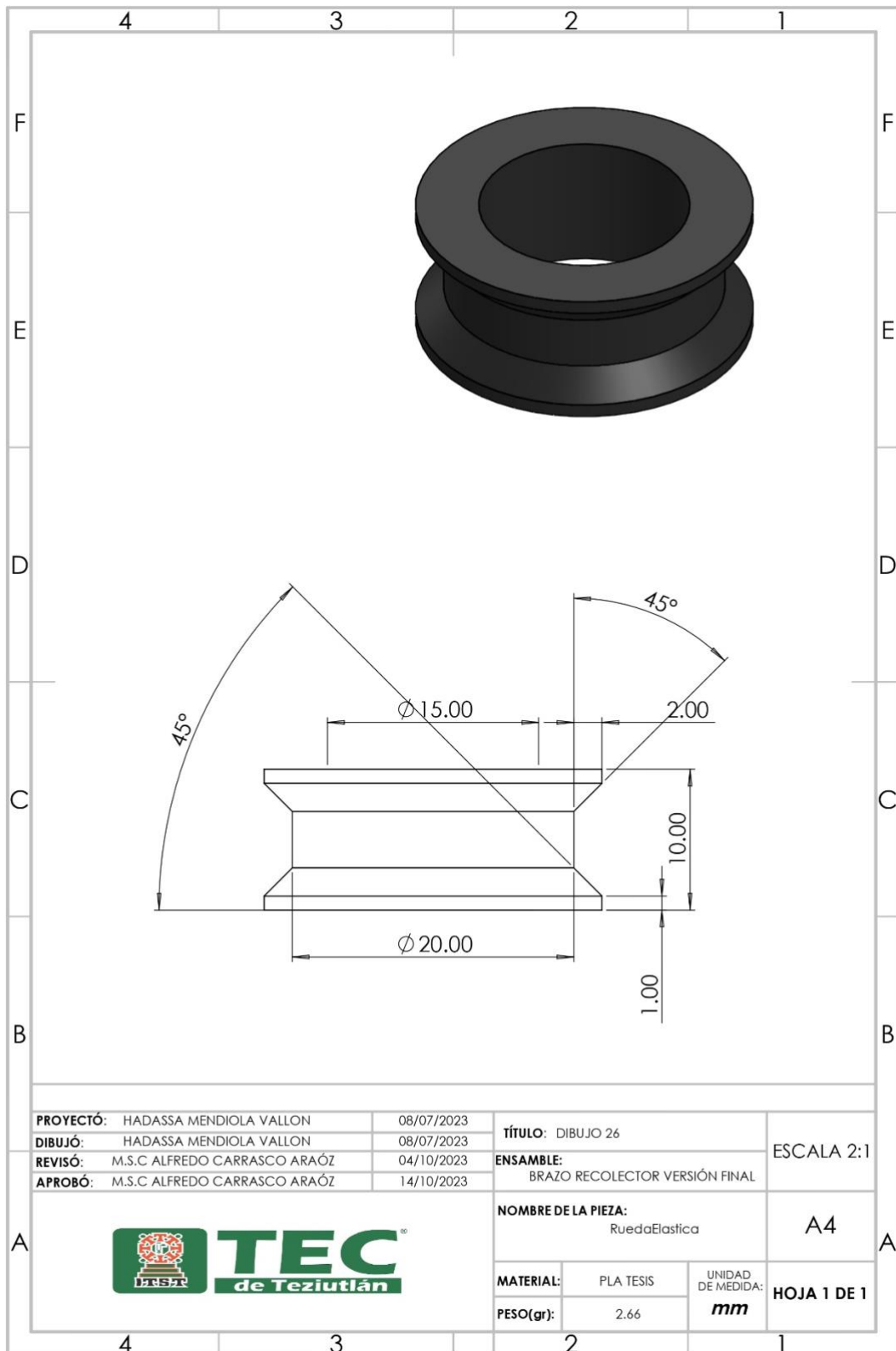


Figura 88. Dibujo en SolidWorks "Rueda elástica". Autor propio

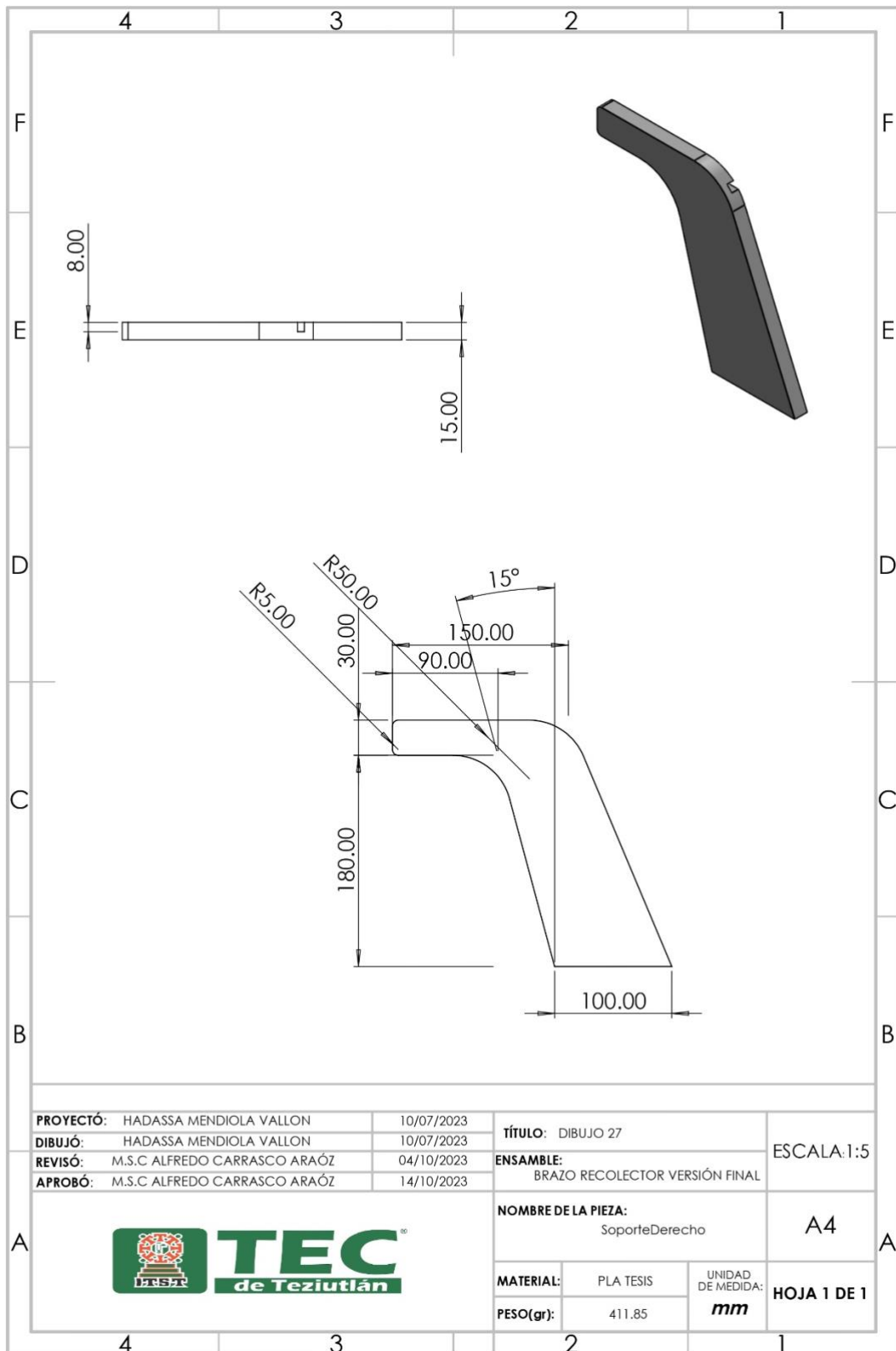


Figura 89. Dibujo en SolidWorks "Soporte Derecho". Autor propio

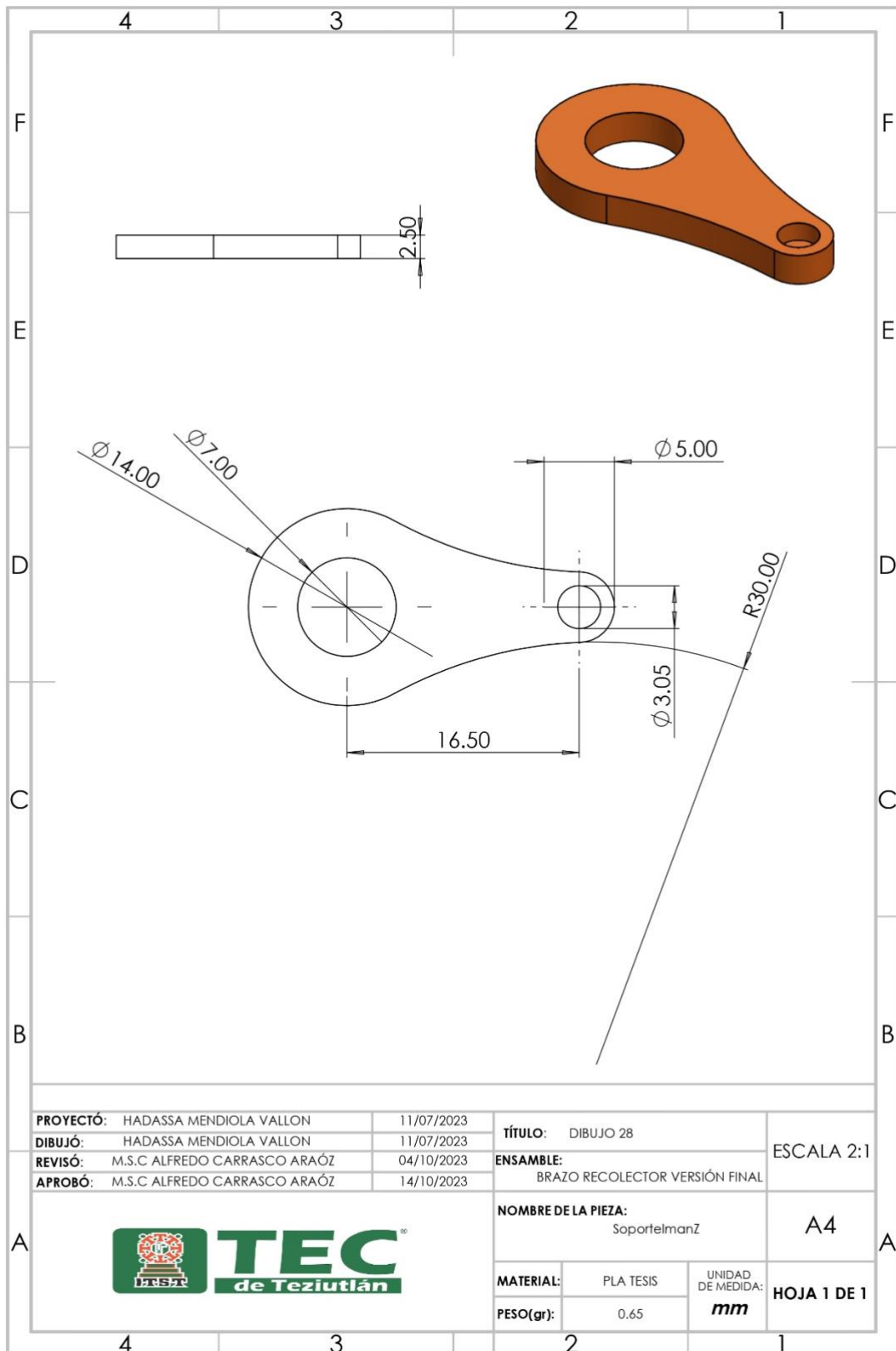


Figura 90. Dibujo en SolidWorks "Soporte Imán Z". Autor propio

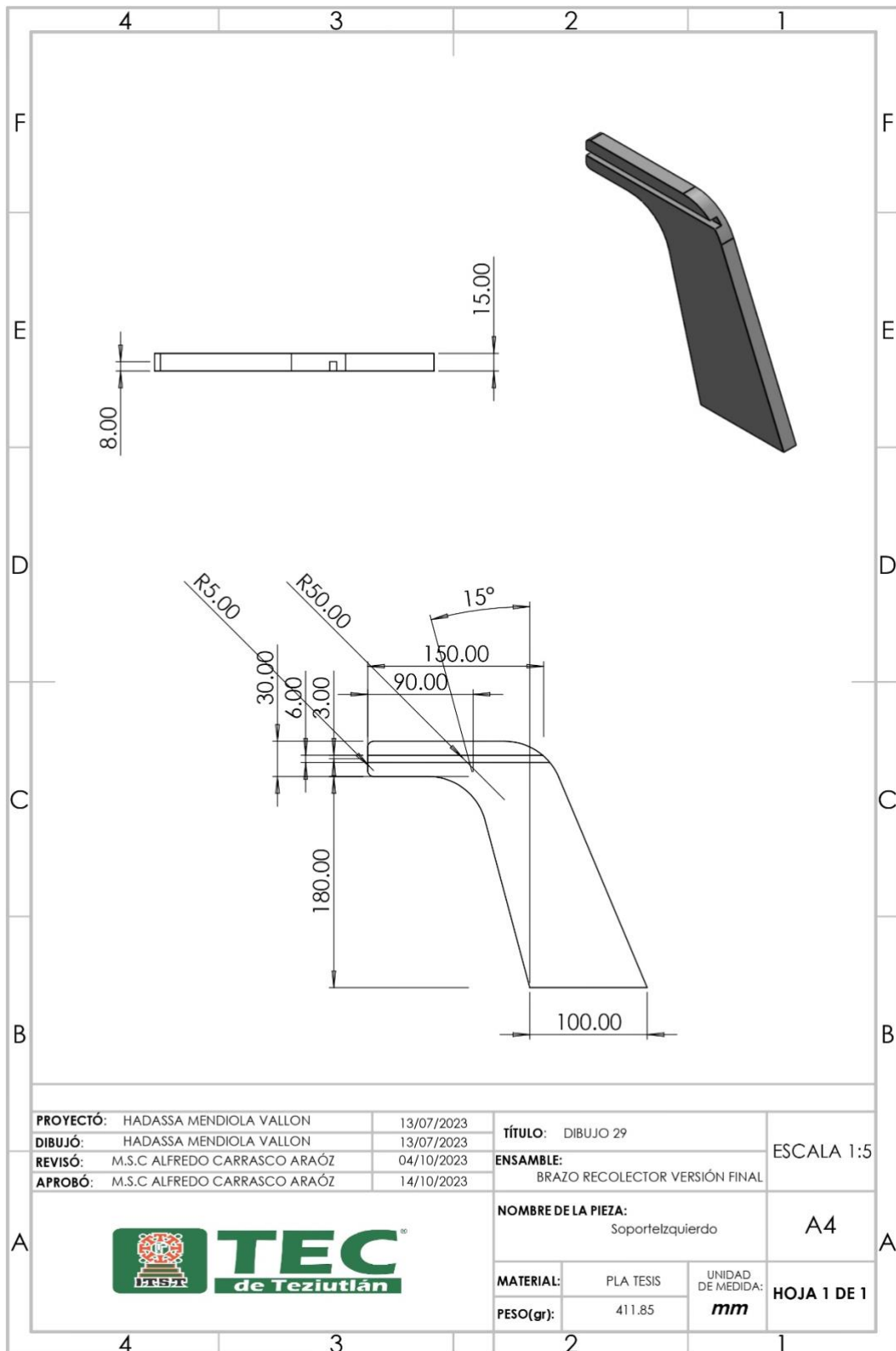


Figura 91. Dibujo en SolidWorks "Soporte Izquierdo". Autor propio

Anexo B. Componentes de la garra

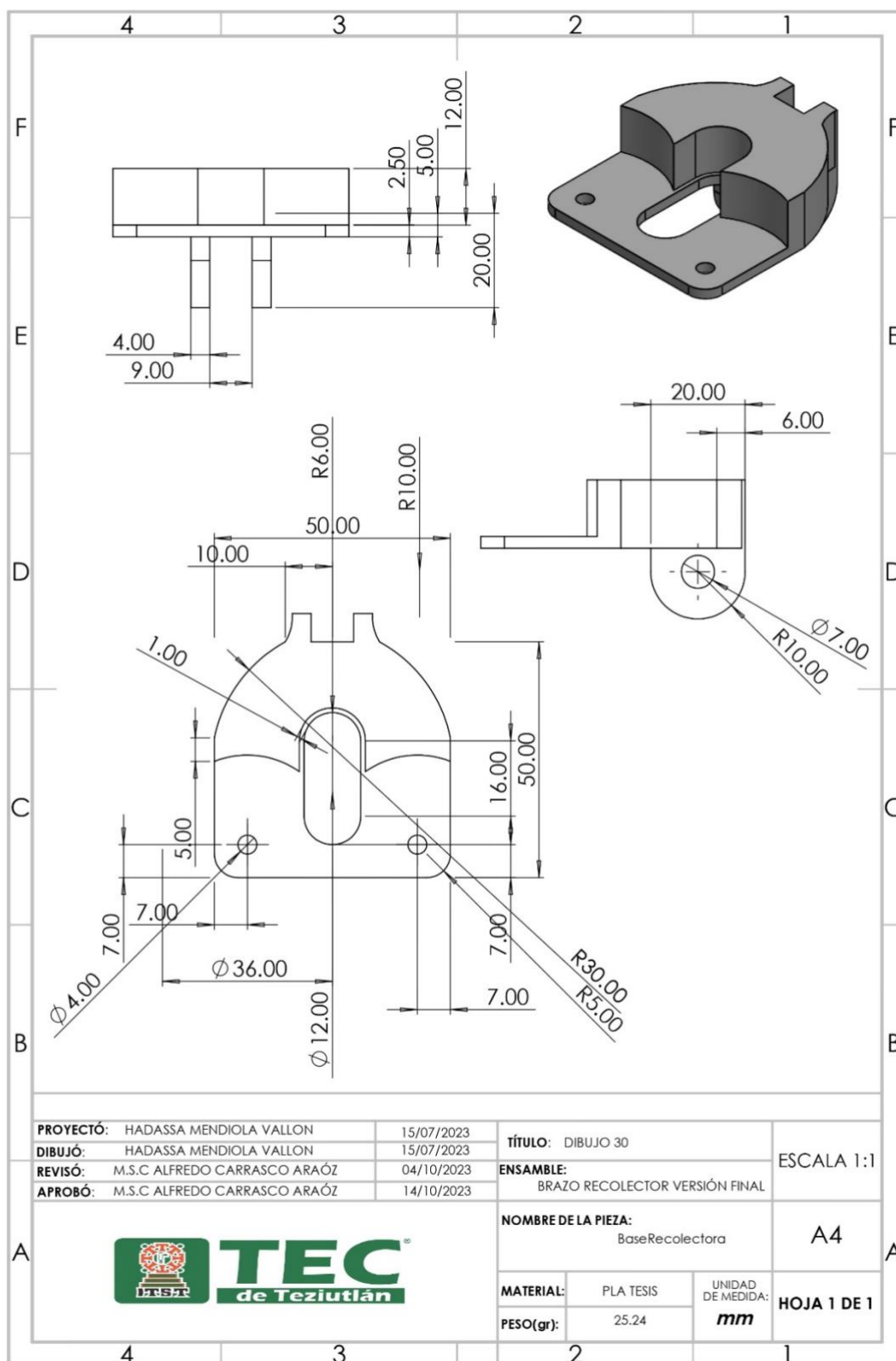


Figura 92. Dibujo en SolidWorks "Base Recolectora". Autor propio

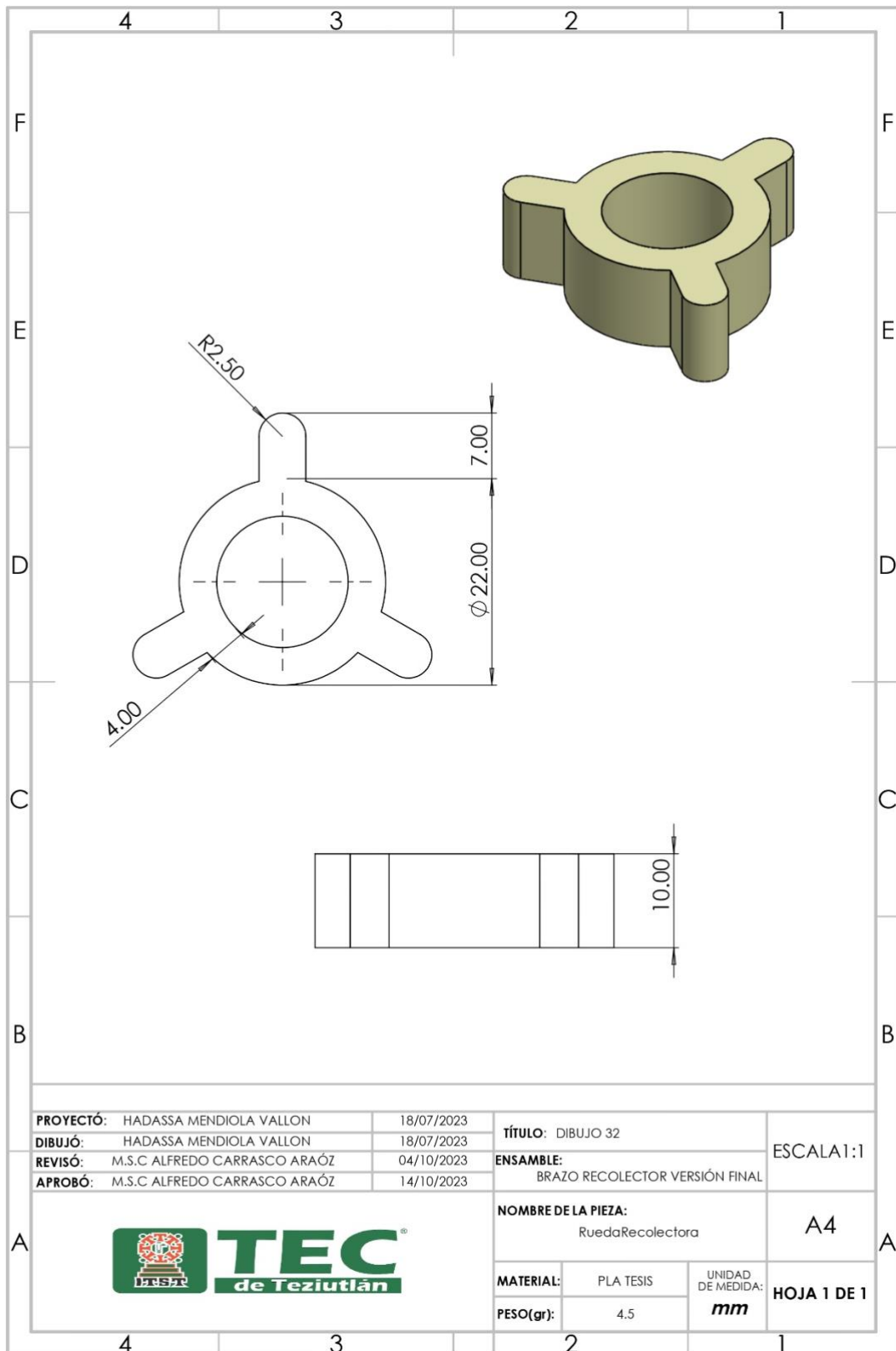


Figura 93. Dibujo en SolidWorks "Rueda Recolectora". Autor propio

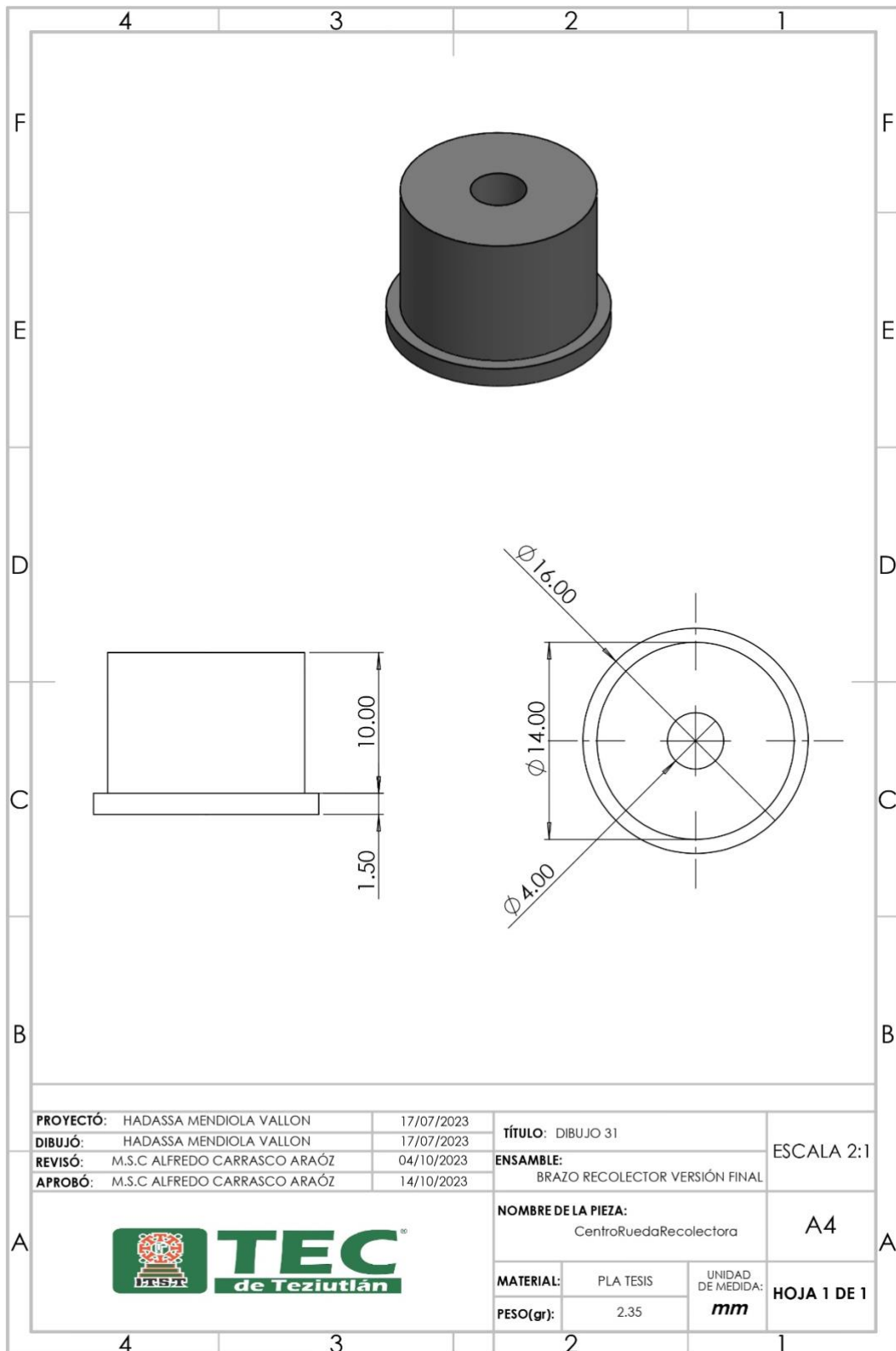


Figura 94. Dibujo en SolidWorks "Centro Rueda Recolectora". Autor propio

Anexo C. Carta de autorización del autor para la consulta y publicación electrónica del trabajo de investigación

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

CARTA DE AUTORIZACIÓN DEL(LA) AUTOR(A) PARA LA CONSULTA Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe:

HADASSA

MENDIOLA

VALLON

Con Número de
Control **19TE0491**

Perteneciente al
Programa **INGENIERÍA MECATRÓNICA**
Educativo

Por este conducto me permito informar que he dado mi autorización para la consulta y publicación electrónica del trabajo de investigación en los repositorios académicos.

Registrado con el
producto: **TESIS**

Cuyo Tema es:

PROPUESTA DE DISEÑO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO DE BRAZO MANIPULADOR PARA LA RECOLECCIÓN DE GRANOS DE CAFÉ

Correspondiente al periodo:

AGOSTO-DICIEMBRE 2023

Y cuyo(a) director(a) de tesis es:

M.S.C. ALFREDO CARRASCO ÁRAOZ

ATENTAMENTE

HADASSA MENDIOLA VALLON

Nombre y firma

Fecha de emisión: **31/01/2024**
c.c.p. Subdirección Académica

Ilustración 95. Carta de autorización por el ITST.

Anexo D. Dictamen de comité revisor

	EDUCACIÓN SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA			TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO	Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán
---	---	---	---	---------------------------------------	--

Asunto: **Asignación de Asesor(a), Comisión Revisora, Entrega de Trabajo Profesional y Dictamen**

Teziutlán, Puebla, **03/enero/2024**

Asesor(a): **ALFREDO CARRASCO ARAOZ**
Integrante de Comisión Revisora: **LUIS MANUEL GARCIA MARTINEZ**
Integrante de Comisión Revisora: **JAVIER GONZALEZ BAEZ**
Presentes

Por este medio me permito informar que ha sido asignado como asesor(a) y comisión revisora del trabajo profesional que se convertirá en Tesis de:

Alumno(a): **MENDIOLA VALLON HADASSA**
Apellido paterno/materno/nombre (s)

Número de Control: **19TE0491** Licenciatura o Posgrado: **INGENIERIA MECATRONICA**

Plan: **2010** Correo Electrónico: **L19TE0491@TEZIUTLAN.TECNM.MX**

Cuyo tema es: **PROPUESTA DE DISEÑO Y ANALISIS CINEMATICO DE BRAZO MANIPULADOR PARA LA RECOLECCION DE GRANOS DE CAFÉ**
25 palabras (máximo)

Se ha enviado a su correo institucional el trabajo profesional o de grado, por lo cual la comisión revisora tendrá 5 días hábiles para realizar las observaciones al alumnado, el(la) interesado(a) tendrá igualmente **5 días** para corregir y las enviará al correo electrónico institucional de la comisión revisora, agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de licenciatura o de posgrado de nuestro alumnado egresado.

Dictamen de Comisión Revisora, Aprobación de Impresión o Grabación y Autorización para subirla al Repositorio del TecNM

Siendo el día: 31 de enero de 2024 se reunieron los miembros de la comisión para revisar el trabajo asignado y una vez analizado se decidió liberarlo y aprobarlo para su impresión y programación de examen profesional.

ALFREDO CARRASCO ARAOZ Nombre y Firma del(la) Asesor(a)	LUIS MANUEL GARCIA MARTINEZ Nombre y Firma de integrante de la Comisión Revisora
JAVIER GONZALEZ BAEZ Nombre y Firma de integrante de la Comisión Revisora	MYRIAM SANCHEZ PEREZ Subdirección Académica

R08/06/2023
Folio:26

GOBIERNO DEL ESTADO
S.E.P.
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE TEZIUTLÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

F-SAC-18

		
---	---	---

Fracción I y II s/n Aire Libre, Teziutlán, Puebla, C.P. 73960 Tels. 231 311 4000 / 4001 / 4002 / 4003
e-mail: itsteziutlan@hotmail.com | www.teziutlan.tecnm.mx

**2024**
Felipe Carrillo
PUERTO
PRESENTE DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE PUEBLA

Ilustración 96. Dictamen por el comité revisor del ITST.

Anexo E. Licencia de uso

LICENCIA DE USO OTORGADA POR Hadassa Mendiola Vallon, de nacionalidad Mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en la carretera Nacional San Rafael-Nautla, El Ojite, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor(a) de la tesis denominada "Propuesta de diseño y análisis cinemático de brazo manipulador para la recolección de granos de café" en adelante "LA OBRA" quien para todos los fines del presente documento se denominará "EL(LA) AUTOR(A) Y/O EL(LA) TITULAR", a favor del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán del Tecnológico Nacional de México, la cual se regirá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA –OBJETO: "EL(LA) AUTOR(A) Y/O EL(LA) TITULAR", mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de "LA OBRA", para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

SEGUNDA - TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

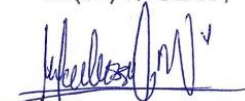
TERCERA -ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para formato uso de "LA OBRA" en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (en red), mensaje de datos o similar, conocido o por conocerse.

CUARTA – EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán; por lo tanto, "EL(LA) AUTOR(A) Y/O EL(LA) TITULAR" conserva los derechos patrimoniales y morales de "LA OBRA", objeto del presente documento.

QUINTA – CRÉDITOS: El Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que "EL(LA) AUTOR(A) Y/O EL(LA) TITULAR" es el(la) único(a), primigenio(a) y perpetuo(a) titular de los derechos morales sobre "LA OBRA"; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA – AUTORÍA: "EL(LA) AUTOR(A) Y/O EL(LA) TITULAR" manifiesta ser el(la) único(a) titular de los derechos de autor que derivan de "LA OBRA" y declara que el material objeto del presente fue realizado por él(ella), sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el(la) único(a) responsable. Dado en la Ciudad de Teziutlán, Puebla, a los quince días del mes enero de 2024.

"EL(LA) AUTOR(A) Y/O
EL(LA) TITULAR",


Hadassa Mendiola Vallon
Nombre y Firma

"EL INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE TEZIUTLÁN"


Arminda Juárez Arroyo
Directora General
Nombre, Firma y Sello



Ilustración 97. Licencia de uso

Índice de Figuras

Figura 1. Zona de influencia del Tecnológico Superior de Teziutlán a 30Km. Fuente: ITST, 2019	11
Figura 2. Ubicación del ITST. Fuente: Maps.....	13
Figura 3. Robot y su interacción con el entorno. Fuente: (Ollero, 2001).	17
Figura 4. Robot Unatime 2000. Fuente: Barrientos, Antonio, Fundamentos de Robótica, (2007).	20
Figura 5. Cadena Cinemática abierta. Fuente: (Ollero Baturone, 2001).	21
Figura 6. Articulaciones comunes en robots manipuladores: (a) rotacional con 1-GDL; (b) cilíndrica con 2-GDL; (c) esférica con 3-GDL; (d) prismática con 1-GDL; (e) planar con 2-GDL. Fuente: (Ferraté & otros, 1986).....	22
Figura 7. Pérdida de grados de libertad en estructura con dos eslabones: a) dos grados de libertad y b) un grado de libertad.	22
Figura 8. Diagrama de bloques de un sistema robótico. Fuente: (Miranda Colorado, 2016).....	24
Figura 9. Configuraciones de robots manipuladores industriales. Fuente: (Ferraté & otros, 1986).....	24
Figura 10. a) Manipulador PUMA (Programmable Universal Manipulador Assembly). b) Manipulador Cincinnati Milacron T3 735.Fuente: (Miranda Colorado, 2016). ..	25
Figura 11. Manipulador Stanford. Fuente: (Miranda Colorado, 2016)	26
Figura 12. Robot SCARA en los laboratorios del Instituto Andaluz de Automática y Robótica, Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Fuente: (Ollero Baturone, 2001)	26
Figura 13. Manipulador cilíndrico. Fuente: (Miranda Colorado, 2016)	27
Figura 14. Estructura de un manipulador cartesiano. Fuente: (Miranda Colorado, 2016).....	28
Figura 15. Manipulador con configuración angular y muñeca con 3GDL. Fuente: (Ferraté & otros, 1986)	28
Figura 16. Seis posibles articulaciones de par menor. Fuente: (Craig J. J., 2005) 29	
Figura 17. El desplazamiento del vínculo d y el ángulo de articulación θ , son dos parámetros que pueden usarse para describir la naturaleza de la conexión entre vínculos adyacentes. Fuente: (Craig J. J., 2005).....	30
Figura 18. Parámetro D-H para un eslabón giratorio. Fuente: (Barrientos, 2007). 33	
Figura 19. Deflexión en viga. (P. Beer, 2007).....	35
Figura 20. Representación de una armadura. (P. Beer, 2007)	35
Figura 21. Representación de una armadura. (P. Beer, 2007)	36
Figura 22. Fases del proceso de diseño que reconocen múltiples retroalimentaciones e iteraciones. (G. Budynas, 2015).....	37
Figura 23. Ensamble de la versión número 1 en SolidWorks. Autor propio.	40
Figura 24. Ensamble de la versión número 1, vista isométrica en SolidWorks. Autor propio.	41
Figura 25. Ensamble de la versión número 2 en SolidWorks. Autor propio.	42
Figura 26 Ensamble de la versión número 2, vista en plano x-y en SolidWorks. Autor	

propio.....	43
Figura 27. Ensamble de la versión número 3, vista en plano x-y en SolidWorks. Autor propio.....	44
Figura 28. Ensamble de la versión número 3, vista lateralmente en SolidWorks. Autor propio.....	45
Ilustración 29. Ensamble de la versión final, en SolidWorks. Autor propio.....	47
Figura 30. Ensamble del brazo manipulador en el software SolidWorks. Autor propio.....	48
Figura 31. Diagrama de cuerpo libre. Autor propio.....	49
Figura 32. Creación de la Viga 2, teniendo las medidas en metros de x y y para los nodos. Autor propio.....	52
Figura 33. Coordenadas de los eslabones que forman la viga 2. Autor propio.	53
Figura 34. Asignación de la carga en el nodo 8, usando newton*mm como unidad de medida para la viga 2. Autor propio.....	54
Figura 35. Apoyos situados en los nodos 1(apoyo fijo) y 2(apoyo móvil) para la viga 2. Autor propio.....	54
Figura 36. Resultado de la viga 2. Los elementos de color azul a tensión y los rojos a compresión. Autor propio.....	55
Figura 37. Creación de la Viga 1, teniendo las medidas en metros de x y y para los nodos. Autor propio.....	61
Figura 38. Coordenadas de los eslabones que forman la viga 1 y asignación de la carga en el nodo 8, usando newton*mm como unidad de medida. Autor propio.	62
Figura 39. Apoyos situados en los nodos 1(apoyo fijo) y 2(apoyo móvil) para la viga 1. Autor propio.....	62
Figura 40. Resultado de la viga 2. Autor propio.....	63
Figura 41. Cronograma de actividades para el registro de residencia profesional.	69
Figura 42. Filamento para impresión 3D color verde. Obtenido de: https://www.impresoras3dpuebla.com/pla	75
Figura 43. Filamento para impresión 3D color blanco. Obtenido de: https://www.impresoras3dpuebla.com/pla	75
Figura 44. Resultados prueba de tensión para PLA, PCL y Lay-Fomm 40. : promedio, S: desviación estándar, P: porcentaje de relleno, A: ángulo de trama. (Zuleima, 2019).....	76
Ilustración 45. Resultados prueba de compresión para PLA y PCL. : promedio, S: desviación estándar, P: porcentaje de relleno, A: ángulo de trama. (Zuleima, 2019).	77
Figura 46. Configuración del material "PLA TESIS" con las especificaciones obtenidas en el software SolidWorks. Autor propio.....	77
Figura 47. Componente "Brazo" el cual se toma como viga, para estudio en el software SolidWorks. Autor propio.....	78
Figura 48. Componente "Brazo" modificado, con enfoque en la sujeción, en el software SolidWorks. Autor propio.....	78
Figura 49. Componente "Brazo" modificado, con enfoque en la carga aplicada, en el software SolidWorks. Autor propio.....	79

Figura 50. Tensión VonMises en escala real, en el software SolidWorks. Autor propio.	79
Figura 51. Resultado de punto máximo de tensión en la viga, en el software SolidWorks. Autor propio.	80
Figura 52. Punto de tensión mínima en la viga, en el software SolidWorks. Autor propio.	80
Figura 53. Tensión de VonMises escala establecida a 100, en el software SolidWorks. Autor propio.	81
Figura 54. Desplazamiento en "x", valor máximo y mínimo, en el software SolidWorks. Autor propio.	81
Figura 55. Desplazamiento en "x", escala definida a 100, en el software SolidWorks. Autor propio.	82
Figura 56. Deformación unitaria en X, escala real, en el software SolidWorks. Autor propio.	82
Figura 57. Deformación unitaria normal en dirección a X, escala real, en el software SolidWorks. Autor propio.	83
Figura 58. Deformación unitaria normal en dirección a X, escala definida a 100, en el software SolidWorks. Autor propio.	83
Figura 59. Sujeción y fuerza aplicada a la viga en el software SolidWorks. Autor propio.	84
Figura 60. Dirección y valor de la fuerza aplicada en viga en el software SolidWorks. Autor propio.	84
Figura 61. Tensión nodal VonMises el software SolidWorks. Autor propio.	85
Figura 62. Máxima y mínima tensión de VonMises aplicada en la viga dentro del software SolidWorks. Autor propio.	85
Figura 63. Desplazamiento estático en Y de la viga dentro del software SolidWorks. Autor propio.	86
Figura 64. Desplazamiento estático en Y de la viga con escala a 15 dentro del software SolidWorks. Autor.	86
Figura 65. Deformación unitaria equivalente en la viga con escala normal dentro del software SolidWorks. Autor propio.	87
Figura 66. Deformación unitaria equivalente en la viga con escala definida a 15 dentro del software SolidWorks. Autor propio.	88
Figura 67. Dibujo en SolidWorks "Base cámara derecha". Autor propio	102
Figura 68. Dibujo en SolidWorks "Base Eje Z". Autor propio.	103
Figura 69. Dibujo en SolidWorks "Base General". Autor propio	104
Figura 70. Dibujo en SolidWorks "Base Motor Z". Autor propio	105
Figura 71. Dibujo en SolidWorks "Base Sensor Codo". Autor propio	106
Figura 72. Dibujo en SolidWorks "Base Superior". Autor propio	107
Figura 73. Dibujo en SolidWorks "Bombro2". Autor propio	108
Figura 74. Dibujo en SolidWorks "Brazo". Autor propio	109
Figura 75. Dibujo en SolidWorks "Cubierta Hall". Autor propio	110
Figura 76. Dibujo en SolidWorks "Cubierta Sensor". Autor propio	111
Figura 77. Dibujo en SolidWorks "Eje Principal". Autor propio	112

Figura 78. Dibujo en SolidWorks "Eje Secundario". Autor propio	113
Figura 79. Dibujo en SolidWorks "Eje Z". Autor propio	114
Figura 80. Dibujo en SolidWorks "Engrane Motor Z". Autor propio	115
Figura 81. Dibujo en SolidWorks "Engrane Codo". Autor propio.....	116
Figura 82. Dibujo en SolidWorks "Engrane Eje Z". Autor propio.....	117
Figura 83. Dibujo en SolidWorks "Engrane Motor a Pasos". Autor propio	118
Figura 84. Dibujo en SolidWorks "Imán". Autor propio	119
Figura 85. Dibujo en SolidWorks "Motor". Autor propio	120
Figura 86. Dibujo en SolidWorks "Polea Codo 1". Autor propio	121
Figura 87. Dibujo en SolidWorks "Polea Codo 2". Autor propio	122
Figura 88. Dibujo en SolidWorks "Rueda elástica". Autor propio	123
Figura 89. Dibujo en SolidWorks "Soporte Derecho". Autor propio.....	124
Figura 90. Dibujo en SolidWorks "Soporte Imán Z". Autor propio	125
Figura 91. Dibujo en SolidWorks "Soporte Izquierdo". Autor propio	126
Figura 92. Dibujo en SolidWorks "Base Recolectora". Autor propio	127
Figura 93. Dibujo en SolidWorks "Rueda Recolectora". Autor propio	128
Figura 94. Dibujo en SolidWorks "Centro Rueda Recolectora". Autor propio.....	129
Ilustración 95. Carta de autorización por el ITST.	130
Ilustración 96. Dictamen por el comité revisor del ITST.....	131
Ilustración 97. Licencia de uso	132

Índice de tablas

Tabla 1. Ponderación establecida por el asesor de tesis de la versión 1.....	41
Tabla 2. Ponderación establecida por el productor de café de la versión 1.....	41
Tabla 3. Ponderación establecida por diseñadora de la versión 1.....	42
Tabla 4. Ponderación establecida por el asesor de tesis de la versión 2 del brazo manipulador.	43
Tabla 5. Ponderación establecida por el productor de café de la versión 2 del brazo manipulador.	43
Tabla 6. Ponderación establecida por diseñadora de la versión 2 del brazo manipulador.	44
Tabla 7. Ponderación establecida por el asesor de tesis para la versión 3 del brazo manipulador.	45
Tabla 8. Ponderación establecida por el productor de café de la versión 3 del brazo manipulador.	45
Tabla 9. Ponderación establecida por diseñadora de la versión 3 del brazo manipulador.	46
Tabla 10. Ponderación establecida por el asesor de tesis de la versión final del brazo manipulador.	47
Tabla 11. Ponderación establecida por el productor de café de la versión final del brazo manipulador.....	47

Tabla 12. Ponderación establecida por diseñadora de la versión final del brazo manipulador.	48
Tabla 13. Parámetros D-H para este robot manipulador de 3GDL.	50
Tabla 14. Resultados de las 13 barras en la calculadora de armaduras isostáticas. Elaboración propia en: https://valdivia.staff.jade-hs.de/starrkoerper_es.html	74
Tabla 15. Apoyos en X y Y. Elaboración propia en: https://valdivia.staff.jade-hs.de/starrkoerper_es.html	74