

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado



Desarrollo y construcción de una suspensión para robots móviles usados en ambientes no estructurados

Tesis

Que para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Mecánica con
Orientación Terminal en Mecatrónica y Sistemas Mecánicos

Presenta:

Ing. Osmar Quiroz Moncada

Asesor:

Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo

Co-Asesor:

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

San Luis Potosí, S.L.P., Julio 2020



FACULTAD DE
INGENIERÍA

5 de diciembre de 2019

**ING. OSMAR QUIROZ MONCADA
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Juan Antonio Cárdenas Galindo y Hugo Iván Medellín Castillo**, Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en Mecatrónica y Sistemas Mecánicos**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 5 de diciembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Desarrollo y construcción de una suspensión para robots móviles usados en ambientes no estructurados”

Introducción.

1. Revisión del estado del arte.
2. Síntesis y análisis cinemático de una suspensión pasiva para un robot móvil.
3. Evaluación de la suspensión pasiva y comparativa con otros modelos existentes de suspensión.
4. Diseño y fabricación mediante manufactura aditiva de la suspensión.
5. Validación experimental y discusión de resultados.

Conclusiones.

Referencias.

Anexos.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR. DIRECCION

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“2019, aniversario 160 de la fundación del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí”

Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado y hacer realidad este sueño.

A la UASLP en especial al Centro de investigación y Estudios de posgrado (CIEP) por darme la oportunidad de estudiar una maestría. A todos mis profesores durante este trayecto que me brindaron educación de calidad y me ayudaron a crecer como persona. También quiero agradecer al Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante mis estudios.

Debo agradecer de manera especial y sincera al doctor Antonio Cárdenas Galindo y al doctor Hugo Iván Medellín Castillo por aceptarme para realizar este tema de tesis. Su confianza y apoyo ha sido un aporte invaluable, no solo al desarrollo de ésta tesis sino también a mi formación educativa. Les agradezco también la paciencia y la disponibilidad que tuvieron para la realización de mis actividades.

A mi comité de sinodales Dr. Gilberto Mejía Rodríguez, Dr. Alejandro González de Alba y Dr. Mauro Eduardo Maya Méndez por sus sugerencias para el enriquecimiento de este trabajo.

Para mis compañeros y colegas del CIEP que ayudaron a enriquecer mi formación educativa y con los cuales forme una valiosa amistad. Quiero agradecer de manera especial a Rodrigo Ávila Pérez y Adrián Hernández Zapata que me ayudaron y apoyaron de manera incondicional durante este difícil trayecto.

A todos mis amigos y personas cercanas a mí, que me brindaron todo su apoyo, palabras de aliento y ánimo para seguir adelante. Quiero agradecer de manera especial a: Irais por acompañarme en todo este proceso, pero sobre todo por siempre creer en mí. A Pepe por encontrar las palabras correctas para darme ánimos y por ser un amigo incondicional.

Por último, pero las personas más importantes, mis padres María de Lourdes Moncada Sánchez y Martín Quiroz Rodríguez porque sin ellos este logro no sería posible. Por siempre apoyar mis decisiones, por enseñarme a mejorar en cada aspecto de mi vida y por ser mi ejemplo para seguir.

Resumen

Aunque no existe una definición única, un robot es comúnmente considerado como una máquina programable que puede manipular objetos, moverse por sí mismo, tomar decisiones, inclusive imitar el movimiento de los humanos o animales. Tomando en consideración la definición previa, para un robot, se entiende que éste tiene que moverse de manera autónoma en su espacio de trabajo. Dependiendo la aplicación del robot, el espacio de trabajo puede ser desde una fábrica, una casa o un laboratorio. Sin embargo, si el robot tiene aplicaciones como búsqueda y rescate, exploración, etc., tendrá que moverse en terreno no conocido y posiblemente accidentado, en contraste con los robots usados para el hogar o para la industria donde su ambiente de trabajo es conocido y estructurado.

La movilidad para un robot que se desenvuelve en un ambiente de trabajo no conocido y no estructurado ha llamado la atención de los investigadores debido a que las aplicaciones que puede realizar un robot en este tipo de entornos ayudarían a realizar trabajos de riesgo o en lugares de difícil acceso para un humano. A pesar de que el enfoque de los investigadores se ha centrado en la movilidad de un robot móvil, existen muchos parámetros a mejorar en un sistema de locomoción, desde aumentar la capacidad para atravesar obstáculos, hasta la reducción de torque en los motores del robot móvil. Sin embargo, hay poco trabajo reportado acerca de la estabilidad de la plataforma de carga al pasar sobre terreno accidentado [1]–[3].

Por lo anterior en este trabajo de investigación se analiza, desarrolla y construye una suspensión pasiva capaz de sobrepasar obstáculos mayores a $\frac{3}{4}$ del diámetro de sus llantas, manteniendo un nivel de horizontalidad de su plataforma de carga entre 0° y 15° . El objetivo de ésta investigación es el de crear un prototipo de suspensión pasiva utilizando manufactura aditiva y buscando estabilizar la plataforma de carga del prototipo utilizando un mecanismo pasivo, evitando de ésta manera aumentar la complejidad en el sistema.

El desempeño de la suspensión se valida por simulación y de manera experimental. Los resultados obtenidos demuestran que la suspensión desarrollada es capaz de mantener la plataforma de carga de manera horizontal utilizando el mecanismo de compensación. Al comparar la suspensión propuesta con otros robots móviles reportados en la literatura, se demuestra que la suspensión desarrollada puede competir contra los robots reportados en condiciones igualitarias.

Abstract

Although there is no a single robot definition, it is commonly considered as a programmable machine that can manipulate objects, move by itself, make his own decisions, even mimic the movement of humans or animals. Taking into consideration the previous definition of a robot, it is understood that it has to move autonomously through its workspace. Depending on the application of the robot, the workspace can range from a factory, a house or a laboratory. However, if the robot is used in applications such as search and rescue, exploration, etc., it will have to move in rugged terrain, in contrast to the robots used for home or for industry where its working environment is actually known and structured.

Mobility for a robot that operates in an unfamiliar and unstructured work environment has attracted the attention of researchers, because the applications that a robot can perform in these types of environments would help to carry out hazardous work or in places of difficult access for a human. Although the focus of the researchers has focuses on the mobility of a mobile robot, there are many parameters to improve in a locomotion system, from increasing the ability to cross obstacles, to reducing torque in the mobile robot's engines. However, there is little reported work on the stability of the platform when passing over rough terrain.

Therefore, in this research work, a passive suspension capable of overcoming obstacles greater than $\frac{3}{4}$ of the diameter of the wheels is analyzed, developed and constructed. Keeping a level of horizontality between 0° and 15° . The objective of this research is to create a prototype of a passive suspension based on a passive mechanism to stabilize the load platform and using additive manufacturing for its fabrication, avoiding in this way the increment of its complexity.

The performance of the suspension it is validated by simulation and by experiments. The results obtained show that the suspension developed can maintain the loading platform horizontally using the compensation mechanism. When comparing the proposed suspension with other mobile robots reported in the literature, the results show that the new suspension can compete against robots reported under the same conditions.

Contenido

Agradecimientos	i
Resumen.....	ii
Abstract	iii
Contenido.....	iv
Índices de figuras.....	vi
Índices de tablas.....	ix
Introducción	1
Justificación	2
Hipótesis.....	3
Objetivos específicos.....	3
Alcance	3
Organización de la tesis.....	4
1. Revisión del estado del arte	6
1.1. Introducción a la robótica	6
1.2. Robots móviles	8
1.3. Locomoción de robots móviles	9
1.3.1. Combinación de sistemas de locomoción	10
1.3.2. Locomoción basada en ruedas.....	12
1.3.4. Análisis de sistemas basados en ruedas.....	14
1.3.5. Otros sistemas de locomoción	16
1.4. Robots con ruedas en terrenos accidentados o con obstáculos.....	19
2. Síntesis y análisis cinemático de una suspensión pasiva para un robot móvil	21
2.1. Análisis cinemático suspensión CIEP_1 (2020)	22
2.2. Simulación numérica suspensión CIEP_1 (2020).....	31
2.3. Evaluación y selección de casos para compensación de plataforma de carga	32
2.4. Diseño de mecanismo para compensación de plataforma de carga	34
2.5. Simulación de mecanismo de plataforma de carga	36
3. Evaluación de la suspensión pasiva y comparativa con otros modelos existentes de suspensión.....	39
3.1. Análisis cinemático de suspensiones reportadas en literatura.....	39
3.2. Simulación cinemática de suspensiones	43
3.3. Comparativa entre suspensiones reportadas contra suspensión CIEP_1 2020.....	45

4.	Diseño y fabricación mediante manufactura aditiva de la suspensión.....	51
4.1	Análisis estructural.....	51
4.2.	Modelado CAD de piezas requeridas.....	56
4.2.1.	Subensamble llanta frontal o trasera.....	56
4.2.2.	Subensamble llanta central.....	59
4.2.3.	Subensamble vigas.....	61
4.3.	Pruebas de tolerancia por medio de manufactura aditiva para ensamblaje de componentes.....	65
4.4.	Ensamble de suspensión.....	70
5.	Validación experimental y discusión de resultados.....	73
5.1.	Enfoques preliminares de validación experimenta.....	73
5.1.1.	Método 1: unidad de medición inercial.....	73
5.1.2.	Método 2: <i>Encoder</i> AMT102-V.....	75
5.2.	Enfoques funcionales de validación experimental.....	76
5.2.1.	Método 3: Transportador como instrumento de medición.....	76
5.2.2.	Método 4: Burbuja digital.....	80
5.3.	Resultados de los diferentes métodos de medición propuestos.....	82
5.4.	Prueba experimental sobre todos los obstáculos del terreno de pruebas.....	83
5.5.	Discusión de resultados de prueba experimental sobre terreno de pruebas.....	86
5.6	Suspensión CIEP_1 2020 en terrenos asimétricos.....	86
5.7.	Simulaciones en terrenos asimétricos.....	89
5.7.1.	Análisis de suspensión <i>Three Bogie</i>	91
5.7.2.	Análisis de suspensión <i>Rocker-Bogie</i>	92
5.7.3.	Análisis de suspensión <i>Parallel Bogie</i>	93
5.8.	Discusión de resultados de las tres diferentes suspensiones en terrenos asimétricos....	94
	Conclusiones.....	96
	Referencias.....	98
	Anexo A1 Planos de construcción.....	102

Índices de figuras

Figura 1.1. Ejemplo Suspensión Rocker-Bogie [19].	9
Figura 1.2. Rocker-Pillar: (a) oruga con un solo punto de apoyo. (b) oruga desplegada para atravesar hoyos. [21].	10
Figura 1.3. RHMBot: a) modo rueda. b) modo extendido. c) modo subir obstáculos [22].	11
Figura 1.4. Robot RT-Mover [3].	11
Figura 1.5. Robot SHRIMP [23].	12
Figura 1.6. Robot OCTOPUS [24].	13
Figura 1.7. Plataforma omnidireccional [25].	13
Figura 1.8. Wheel arm robot [33].	17
Figura 1.9. Imobot [35].	18
Figura 1.10. Diagrama Multilayered suspension [2].	18
Figura 2.1. Esquema de suspensiones basadas en ruedas: (a) Suspensión SCARAB, (b) Suspensión RCL-C, (c) suspensión Double Bogie, (d) suspensión CRAB, (e) suspensión MER, (f) Suspensión SHRIMP, (g) Suspensión RCL-E, (h) Suspensión PEGASSUS, (i) Suspensión OCTOPUS, [11]	21
Figura 2.2. Esquematación primera propuesta CIEP_1 (2011).	22
Figura 2.3. Paralelogramo acoplado a suspensión.	23
Figura 2.4. Paralelogramo acoplado a suspensión con dos grados de libertad.	23
Figura 2.5. Suspensión CIEP_1 (2011) modelada en aluminio.	25
Figura 2.6 trayectorias generadas a) todos los eslabones (escala 2:1), b) todos los eslabones (escala 1:2), c) Eslabón R1 (escala 2:1).	27
Figura 2.7 Trayectorias generadas d) Eslabón R2 (escala 2:1), e) Eslabón R3 (escala 2:1), f) Eslabón R1 (escala1:2).	28
Figura 2.8 Trayectorias generadas.). g) Eslabón R2 (escala 1:2), h) Eslabón (escala 1:2), i) Eslabón R1 mayor a los demás.	29
Figura 2.9 Trayectorias generadas. j) Eslabón R2 mayor a los demás, k) Eslabón R3 mayor a los demás, l) Eslabón R3 mayor a los demás.	30
Figura 2.10. Suspensión propuesta simplificada.	31
Figura 2.11. Simulación numérica paralelogramo: a) rueda frontal subiendo obstáculos $\phi_2 > 0$ b) rueda frontal bajando un obstáculo $\phi_2 < 0$.	31
Figura 2.12. Simulación numérica paralelogramo: a) rueda central subiendo obstáculo. b) rueda central bajando obstáculo.	32
Figura 2.13. Simulación numérica paralelogramo: a) rueda trasera subiendo un obstáculo $\phi_1 < 0$ b) rueda trasera bajando un obstáculo $\phi_1 > 0$.	32
Figura 2.14. trayectorias empalmadas de los tres casos simulados.	33
Figura 2.15. trayectoria seleccionada para compensación de plataforma de carga.	33
Figura 2.16. Esquema trayectorias seleccionadas.	34
Figura 2.17. Trayectorias seleccionadas con un acercamiento.	34
Figura 2.18. Bosquejo eslabón para compensación de plataforma de carga.	35
Figura 2.19. Vista de explosión eslabón para compensación de plataforma de carga.	35
Figura 2.20. Modelo CAD del eslabón para compensación de plataforma de carga.	35
Figura 2.21. Terreno de pruebas propuesto.	36
Figura 2.22. Gráfica desplazamiento angular de la suspensión CIEP_1 (2020) mientras atraviesa el terreno de pruebas.	37
Figura 2.23. Movimiento del dispositivo deslizador. a) Tres llantas sobre el suelo, b) Llanta central sobre obstáculo.	37
Figura 3.1. Robot Sojourner.	40
Figura 3.2. Esquematación Rocker-Bogie.	40

Figura 3.3. Esquematación bogie paralelo. _____	41
Figura 3.4. Configuración 3 Bogie [42]. _____	42
Figura 3.5. Gráfica ángulo contra tiempo (Rocker Bogie). _____	44
Figura 3.6. Gráfica ángulo contra tiempo (Parallel Bogie). _____	44
Figura 3.7. Gráfica ángulo contra tiempo (Three Bogie). _____	44
Figura 3.8. Gráfica de las cuatro configuraciones simuladas. _____	45
Figura 3.9. Secciones utilizadas para la obtención de la norma. _____	46
Figura 3.10. Posiciones tomadas para la medición de ángulos en la norma y norma ponderada a) Llanta frontal sobre obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. b) Llanta central sobre obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. c) Llanta trasera sobre obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. d) Llanta frontal y central sobre escalón de 25.5 mm de alto. e) Llanta central y trasera sobre escalón de 25.5 mm de alto. f) Llanta frontal dentro de bache. g) Llanta central dentro de bache. h) Llanta trasera dentro de bache. i) Llantas frontal y central sobre obstáculos de 25 mm de alto y llanta trasera a nivel del suelo. j) Llantas central y trasera sobre obstáculos de 25 mm de alto y llanta frontal a nivel del suelo. k) Llantas frontal y central a nivel del suelo y llanta trasera sobre obstáculo de 25 mm de alto. _____	47
Figura 4.1 Vista superior suspensión CIEP_1 2020. _____	51
Figura 4.2. Vista lateral suspensión CIEP_1 2020. _____	52
Figura 4.3. Diagrama viga #1. _____	52
Figura 4.4. Diagrama viga #3. _____	53
Figura 4.5. Diagrama viga #2. _____	53
Figura 4.6. Diagrama de momento flector para cada una de las vigas. a) Viga#1. b) Viga #3. c) Viga #2. _____	53
Figura 4.7. Curva esfuerzo-deformación probetas fabricadas a partir de PLA. _____	55
Figura 4.8. a) Eslabón para llanta. b) Hexágono para realizar ensamble con viga. c) Barreno inferior para insertar eje. _____	57
Figura 4.9. Explosión ensamble llanta. _____	57
Figura 4.10. Corte lateral ensamble llanta. _____	58
Figura 4.11. a) Eslabón conector viga #3. b) Hexágono para realizar ensamble con viga. c) Ensamble llanta eslabón. _____	59
Figura 4.12. a) Vista frontal del modelo simplificado suspensión CIEP_1 2020. b) Vista superior modelo simplificado suspensión CIEP_1 2020. _____	60
Figura 4.13. Componentes eslabón 2_2. _____	60
Figura 4.14 Vista de explosión llanta central. _____	61
Figura 4.15. Explosión eslabones con ruedas y vigas. _____	62
Figura 4.16. Explosión ensamble viga #2 con eslabón seguidor. _____	62
Figura 4.17. Explosión ensamble eslabón seguidor y dispositivo deslizador. _____	63
Figura 4.18 Explosión ensamble plataforma de carga. _____	64
Figura 4.19. CIEP_1 2020 a base de impresión 3D. _____	65
Figura 4.20. Impresora Anet A8. _____	66
Figura 4.21. a) Pieza hembra para pruebas de tolerancia. b) Dimensiones de los barrenos. _____	67
Figura 4.22. Pieza macho para pruebas de tolerancia. _____	67
Figura 4.23. Prueba de ensamble. _____	68
Figura 4.24. Ensamblajes a) Llanta frontal. b) Llanta central. c) Suspensión completa. _____	70
Figura 5.1. Sensor MPU6050 con dispositivo para verificación de medición. _____	74
Figura 5.2. Junta rotativa en plataforma de carga. _____	75
Figura 5.3. Encoder AMT102-V montado en junta rotativa de plataforma de carga _____	76
Figura 5.4. Líneas de referencia para metodología de medición manual. _____	77
Figura 5.5. Colocación y alineación de suspensión CIEP_1 2020 sobre papel cuadriculado. _____	77
Figura 5.6. Generación de marcas: a) Marca inicio eslabón seguidor, b) Marca mitad eslabón seguidor, c) Marca final de eslabón seguidor. _____	78

<i>Figura 5.7. Llantas correspondientes a suspensión.</i>	79
<i>Figura 5.8. Medida de ángulo respecto a la horizontal cuando llanta frontal sobre obstáculo.</i>	79
<i>Figura 5.9. Líneas generadas para cada una de las llantas sobre el obstáculo.</i>	80
<i>Figura 5.10. Suspensión sobre el suelo y celular colocado sobre plataforma de carga.</i>	81
<i>Figura 5.11. Mediciones: a) Llantas frontales sobre obstáculo. b) Llantas centrales sobre obstáculo. c) Llantas traseras sobre obstáculo.</i>	81
<i>Figura 5.12 Marco de referencia para validación de aplicación.</i>	82
<i>Figura 5.13. Terreno de pruebas.</i>	84
<i>Figura 5.14. Pruebas experimentales. a) Llantas frontal y central sobre escalones. b) Llantas central y trasera sobre escalones. c) Llanta frontal dentro del bache. d) Llanta central dentro del bache. e) Llanta trasera dentro del bache. f) Llantas frontal y central sobre rampa. g) Llanta frontal sobre nivel del suelo h) Llanta trasera sobre rampa.</i>	85
<i>Figura 5.15. Vista frontal suspensión (Conexiones entre componentes).</i>	87
<i>Figura 5.16. Vista superior suspensión (Conexiones entre componentes).</i>	87
<i>Figura 5.17. Llanta frontal sobre obstáculo asimétrico.</i>	88
<i>Figura 5.18. Llanta central sobre obstáculo.</i>	88
<i>Figura 5.19. Grado de libertad presentado en terrenos simétricos.</i>	90
<i>Figura 5.20. Ángulos de navegación en suspensión.</i>	90
<i>Figura 5.21. Sistema Coordinado de referencia fijo.</i>	91
<i>Figura 5.22. Sistema Coordinado de referencia móvil.</i>	91
<i>Figura 5.23. Ángulos de navegación para suspensión Three Bogie: a) Yaw vs tiempo, b) Pitch vs tiempo, c) Roll vs tiempo, d) Yaw vs distancia, e) Pitch vs distancia, f) Roll vs distancia.</i>	92
<i>Figura 5.24. Ángulos de navegación para suspensión Rocker-Bogie: a) Yaw vs tiempo, b) Pitch vs tiempo, c) Roll vs tiempo, d) Yaw vs distancia, e) Pitch vs distancia, f) Roll vs distancia.</i>	93
<i>Figura 5.25. Ángulos de navegación para suspensión Parallel Bogie: a) Yaw vs tiempo, b) Pitch vs tiempo, c) Roll vs tiempo, d) Yaw vs distancia, e) Pitch vs distancia, f) Roll vs distancia.</i>	94

Índices de tablas

<i>Tabla 2.1 Dimensiones de los eslabones analizados en simulación numérica para proponer longitudes finales.</i>	25
<i>Tabla 2.2. Dimensiones CIEP_1 modelada en aluminio vs dimensiones propuestas para impresión 3D.</i>	26
<i>Tabla 2.3. Dimensiones del terreno de pruebas propuesto.</i>	36
<i>Tabla 3.1 Dimensiones utilizadas para las simulaciones de las suspensiones.</i>	43
<i>Tabla 3.2. Ángulos máximos de inclinación de la plataforma para las cuatro configuraciones.</i>	46
<i>Tabla 3.3. Ángulos medidos en cada sección para el cálculo de la norma y norma ponderada de cada configuración.</i>	49
<i>Tabla 3.4. Índices de comparación entre sistemas.</i>	49
<i>Tabla 4.1. Cargas aplicadas a cada una de las vigas, reacciones en sus apoyos y momento flector máximo en cada viga.</i>	54
<i>Tabla 4.2 dimensiones propuestas y esfuerzo máximo para vigas de suspensión CIEP_1 2020 .</i>	54
<i>Tabla 4.3. Componentes de ensamble de rueda con eslabón 1.</i>	58
<i>Tabla 4.4. Componentes ensamble rueda central.</i>	61
<i>Tabla 4.5. Componentes viga #2 con eslabón.</i>	63
<i>Tabla 4.6. Componentes ensamble eslabón seguidor con dispositivo deslizador.</i>	63
<i>Tabla 4.7. Componentes ensamble plataforma de carga.</i>	64
<i>Tabla 4.8 Parámetros de impresión.</i>	68
<i>Tabla 4.9. Dimensiones para ensamble con interferencia.</i>	69
<i>Tabla 5.1. Datos obtenidos por la IMU comparado con el dispositivo.</i>	74
<i>Tabla 5.2. Tabla comparativa ángulos de la plataforma de carga obtenidos experimentalmente contra simulación.</i>	83
<i>Tabla 5.3. Ángulos obtenidos en terreno completo.</i>	86
<i>Tabla 5.4. Comparación de ángulos de inclinación en terrenos simétricos y asimétricos de la suspensión Three Bogie.</i>	92
<i>Tabla 5.5. Comparación de ángulos de inclinación en terrenos simétricos y asimétricos de la suspensión Rocker-Bogie.</i>	93
<i>Tabla 5.6. Comparación de ángulos de inclinación en terrenos simétricos y asimétricos de la suspensión Parallel Bogie.</i>	94

Introducción

La robótica es una rama de la ingeniería que se encarga del diseño, fabricación, control y aplicación de los robots. El término “robot” fue acuñado en 1920 gracias a la obra escrita por el checo llamado Karel Capek en donde la palabra checa *robota*, que significa *trabajos forzados* o *trabajador*, fue traducida como robot.

La asociación de industrias robóticas (RIA por sus siglas en inglés) define un robot como:

“Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover material, piezas, herramienta o dispositivos especializados a través de movimientos programados variables para la realización de una variedad de tareas”

Sin embargo, el término acuñado gracias a Karel Capek y la definición dada por la asociación de industrias robótica, conlleva mucho más que lo definido, ya que existe una gran variedad de robots que a su vez se pueden clasificar en diferentes tipos dependiendo de su aplicación, sistema de locomoción, etc.

Una primera generación de robots son los conocidos como robots industriales que trabajan en conjunto con los humanos 24 horas del día, 7 días a la semana. La segunda generación de robots, llamada como robots de servicio, aparecieron gradualmente ofreciendo sus servicios en la vida cotidiana. A diferencia de los robots industriales, los robots de servicio no están fijos físicamente en una posición (Robots móviles), esto les ofrece un rango variado de aplicaciones, pero incrementa la complejidad del sistema.

Las aplicaciones que se esperan de un robot móvil van desde tareas domésticas hasta exploración en terrenos no alcanzados fácilmente por los humanos, incluso en situaciones y/o circunstancias que no pueden ser soportadas por los humanos (presión de las profundidades del mar, la falta de atmósfera del espacio exterior, rescate de personas, fuego de combates armados, búsqueda y neutralización de minas, etc.) [4].

Considerando las situaciones en las que un robot móvil se puede desenvolver, la locomoción en diferentes tipos de terrenos se convierte en un reto a vencer para un robot móvil. Así como las ruedas están muy bien adaptadas para terreno plano y firme, se requieren nuevos conceptos para ambientes accidentados donde se pueda presentar deslizamiento del suelo, terreno suave y desigual, y varias clases de obstáculos [5].

Por lo anteriormente descrito, es necesario definir los requisitos necesarios para una suspensión usada en un robot móvil.

- Reducción de fuerzas causadas por irregularidades del terreno.
- Mantenimiento del contacto del sistema de tracción al terreno.
- Soporte de la carga útil del robot.
- Mantenimiento de la altura óptima del vehículo.

Justificación

La ingeniería es la encargada de aplicar los conocimientos teóricos para la creación de nuevos dispositivos que ayuden al ser humano a mejorar su calidad de vida; sin embargo, la creación de nuevos artefactos o dispositivos lleva consigo una extensa lista de tareas que se tienen que realizar para proporcionar un dispositivo que cumpla con los requisitos de diseño previstos.

Los vehículos robóticos son máquinas conocidas por su movilidad, autonomía y capacidad de operación en ambientes no estructurados. Si bien las características del sentir (medición de datos), pensar (procesamiento de los datos) y actuar (manipulación o movimientos a realizar) es compartido por muchos sistemas robóticos, los vehículos robóticos conllevan un conjunto específico de predicamentos que requieren de soluciones.

Un vehículo robótico no es completamente teleoperado, es decir puede ser autónomo hasta cierto punto. Puede interactuar con los humanos para conocer su misión y reportar resultados, o solicitar ayuda de los humanos cuando encuentra algo con lo que no puede lidiar por sí mismo. A pesar de esto, actualmente no hay una línea de investigación bien definida que divida a los vehículos teleoperados y a los vehículos robóticos inteligentes: en situaciones complicadas y con vehículos complicados, los operadores humanos pueden necesitar asistencia computacional para controlar el vehículo y a su vez el vehículo puede necesitar asistencia humana para lidiar con su ambiente. Este campo de oportunidad es uno de los que vuelven atractivo el seguir realizando investigación y fabricación de prototipos que proponen alternativas de mejora para los sistemas existentes.

El uso de los robots móviles se justifica bajo las siguientes razones o sus combinaciones:

- Tiene un alto costo tener a una persona que realice trabajo en un lugar lejano o de alto riesgo donde su integridad se ve comprometida [6].
- Se complica el control del vehículo robótico por vía remota debido a problemas de comunicación [7].
- Es barato sustituir el trabajo repetitivo realizado por un humano que es fácilmente realizado por un robot móvil y con menos tiempo muerto [8]–[10].

Con base a lo dicho anteriormente existen distintas áreas de aplicación que vuelven atractiva la idea del desarrollo de vehículos robóticos: aplicaciones subterráneas, submarinas, espaciales, de vigilancia y seguridad, militares y otras como limpieza o manejo de materiales peligrosos incluso entretenimiento.

Si se desea crear un robot móvil autónomo, éste debe ser estable y capaz de moverse suavemente sobre el terreno en el que se encuentre debido al tiempo que les toma a los sensores adquirir los datos. Si el vehículo se balancea o gira durante ese tiempo, las imágenes, hablando de un sistema de visión que utilice cámaras, pueden resultar borrosas. Y aunque la solución más obvia es la de detener el vehículo cada vez que desee tomar una imagen, algo menos drástico sería incluir una suspensión más estable y utilizar cámaras de alta velocidad.

En general, mientras la capacidad de procesamiento se vuelve menos costosa, será más económico utilizar un procesamiento más inteligente y rápido, que mejorar los sistemas mecánicos. No obstante, como siempre existirán situaciones o circunstancias que desafíen los límites del procesamiento de los vehículos robóticos, una suspensión mecánica superior seguirá siendo pieza clave de su sistema.

Los robots móviles al igual que un robot industrial común (brazos robóticos), pueden realizar tareas repetitivas eficazmente; no obstante, los robots móviles tienen la capacidad de moverse en su entorno. La mayoría de los robots móviles solo se desplazan por entornos bien estructurados, por ésta razón es indispensable contar con un prototipo que sea capaz de navegar por entornos no estructurados, para que futuros estudiantes del CIEP puedan desarrollar una aplicación, haciendo uso del prototipo resultado de ésta tesis. Por tal motivo el prototipo que se pretende desarrollar se busca que sea capaz de pasar por obstáculos mayores a $\frac{3}{4}$ del diámetro de sus llantas y mantener un ángulo de horizontalidad preestablecido entre 0° y 15° en la plataforma de carga del robot.

Hipótesis

Desarrollar, construir y evaluar el prototipo de una suspensión para un robot móvil capaz de mantener su plataforma de carga dentro de un ángulo de horizontalidad preestablecido, que en este caso es de 15° , al recorrer entornos no estructurados.

Objetivos específicos

- Analizar y desarrollar una suspensión para un robot móvil con base en el trabajo previo [11].
- Construcción de una suspensión pasiva para propósitos de evaluación experimental y validación del modelo propuesto.
- Mantener la plataforma de carga con una variación predefinida en el diseño de 0° a 15° al atravesar obstáculos menores a $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas.
- Efectuar simulaciones y pruebas experimentales para validar y evaluar el comportamiento de la suspensión pasiva.
- Fabricar una suspensión para un robot móvil que pueda ser utilizado en trabajos futuros.

Alcance

Con este trabajo de tesis se buscará el desarrollo de un prototipo a escala, fabricado mediante manufactura aditiva, para la generación de una suspensión pasiva de un robot móvil sobre ruedas, capaz de navegar en ambientes no estructurados. Así como sentar bases y proporcionar dispositivos que puedan usarse para desarrollar teorías enfocadas a cualquier aplicación en que se necesite que un robot se desplace por sí mismo de un sitio de trabajo a otro.

El prototipo se basará en trabajos preliminares desarrollados en el CIEP (suspensión cinemática pasiva CIEP_1 (2011) [11]).

Organización de la tesis

La organización de la tesis es la siguiente:

- *Capítulo 1.* Revisión del estado del arte sobre los robots móviles y sus distintos sistemas de locomoción.
- *Capítulo 2.* Estudio de metodologías de síntesis y análisis cinemático de la suspensión pasiva en diferentes casos de estudio y desarrollo de síntesis del mecanismo utilizado para compensación de la plataforma de carga basado en trabajos previos [11].
- *Capítulo 3.* Análisis cinemático y comparación entre robots móviles. Se analizan tres simulaciones de robots móviles reportados en la literatura y se comparan con la suspensión fabricada.
- *Capítulo 4.* Diseño y fabricación mediante manufactura aditiva, dibujo e impresión de piezas, así como la selección de piezas comerciales, finalizando con la integración de los componentes.
- *Capítulo 5.* Análisis de métodos de evaluación y realización de pruebas experimentales del funcionamiento del prototipo para efectos de valoración de desempeño.
- *Conclusiones.* Se presentan a manera de síntesis las principales conclusiones de cada uno de los capítulos anteriores y se dan recomendaciones para el trabajo a futuro.

1

Revisión del estado del arte

1. Revisión del estado del arte

1.1. Introducción a la robótica

En un principio los robots eran llamados como autómatas, los cuales imitaban el movimiento de un ser animado. Históricamente los autómatas se pueden encontrar a lo largo de la historia el más conocido de estos autómatas es el león mecánico fabricado por Leonardo da Vinci para el rey de Francia en el año 1515.

Los robots se han convertido en un algo indispensable para los humanos, debido a que facilitan muchas tareas, las realizan con mayor rapidez y exactitud además de que son capaces de realizar actividades peligrosas para el ser humano.

Se pueden clasificar de acuerdo con diferentes enfoques, como lo puede ser su arquitectura, aplicación y cronología.

Clasificación según su cronología [12]:

- **Primera generación (1G): manipuladores.** Sistemas mecánicos multifuncionales, realizan tareas previamente programadas que se ejecutan en una secuencia fija. (años cincuenta).
- **Segunda generación (2G): de aprendizaje.** Repiten una secuencia previamente ejecutada por un humano. (años ochenta).
- **Tercera generación (3G): con control sensorizado.** Robots con controladores (CPU), usan datos e información que obtienen de sus sensores. Se desarrolla la visión artificial (años ochenta y noventa).
- **Cuarta generación (4G): inteligentes.** Sensores más sofisticados, utilizan redes neuronales y analizan datos que les permiten la toma de decisiones en tiempo real.

Los robots industriales son los robots más conocidos, son manipuladores multifuncionales reprogramables, capaces de mover material, piezas, herramientas etc. Son utilizados para automatizar procesos que se reflejan en una mayor producción.

Los robots industriales se pueden clasificar por su arquitectura como un robot poli-articulado, entre las desventajas de estos robots se encuentra que trabajan en un lugar fijo y a pesar de que son muy comunes su desarrollo y construcción es muy costoso.

La movilidad en un robot puede otorgar un amplio campo de aplicaciones. Un robot móvil cuenta con las ventajas de un robot industrial común, pero con la capacidad de moverse en su entorno. La movilidad de los robots móviles es una gran ventaja y a su vez es un reto que superar debido a las dificultades que presenta desarrollar un sistema de locomoción apropiado.

La movilidad en terrenos no estructurados es muy limitada debido a la ausencia de sistemas adecuados de locomoción. La mayoría de los sistemas existentes de locomoción en superficie están clasificados en: ruedas, orugas o piernas, y no han evolucionado mucho últimamente [13].

Sistemas de ruedas: Son la solución óptima para ambientes bien estructurados y planos o terrenos regulares. Pero en terrenos no estructurados su movilidad es muy limitada y depende mucho del tipo de ambiente y el tamaño de los obstáculos encontrados.

Sistemas de orugas: Demuestran buenas habilidades todoterreno debido a su buen coeficiente de fricción mientras están en movimiento. Sus ventajas son simplicidad y robustez, pero entre sus desventajas se encuentra que el sistema consume mucha potencia de rodadura por rozamiento durante los giros, esto es, el suelo tiende a fracturarse durante los giros excesivamente cerrados o con radio de giro cero. También es importante remarcar la elevada vibración de la plataforma cuando el terreno no es liso [14].

Sistemas de piernas (caminadores): Están bien adaptados para ambientes no estructurados porque pueden asegurar su estabilidad en un amplio rango de situaciones, pero son mecánicamente complejos y requieren demasiados recursos de control debido a sus grados de libertad por pierna.

Debido a su simplicidad mecánica y su alta eficiencia (energía consumida frente a distancia recorrida), las ruedas es la opción más utilizada y popular en robots móviles. Los sistemas de locomoción basado en ruedas se pueden mover en diferentes tipos de suelo con alta eficiencia. Estos sistemas reducen sus cargas por impacto, consumo de energía y abrasión. Su configuración es más simple que los otros tipos de sistemas locomotores. Los sistemas basados en ruedas han sido usados en exploración planetaria [15], debido a su eficiencia y sencillez. El sistema de locomoción basado en ruedas usado en las exploraciones planetarias es llamado *Rocker Bogie*. El sistema *Rocker-Bogie* es un sistema que cuenta con dos eslabones, tres ruedas por flanco y una junta rotativa. La suspensión *Rocker Bogie* usada en los robots *Sojourner*, *Rocky7*, *MER* y *FIDO* desarrollados por la NASA [16] demuestran que es un sistema de locomoción confiable y robusto y ha sido base fundamental para el desarrollo de nuevas suspensiones.

Las suspensiones móviles se dividen en dos tipos: suspensión activa y suspensión pasiva. La suspensión activa cambia la geometría de sus eslabones utilizando sensores y actuadores lo que la hace mucho más eficiente a la hora de sobrepasar obstáculos, pero esto implica un control mucho más complejo en comparación con la suspensión pasiva que no cuenta con actuadores ni sensores de ningún tipo. Por lo anterior, las suspensiones pasivas son las más utilizadas.

Debido a la simplicidad de una suspensión pasiva, y a que las ruedas son el sistema de locomoción más popular y más utilizado en robots móviles, por su simplicidad mecánica y su alta eficiencia (energía consumida contra distancia recorrida), se eligió el hacer una combinación de ambas para crear una suspensión pasiva móvil basada en ruedas, la cual se denominó CIEP_1 2011 [11].

1.2. Robots móviles

La robótica ha alcanzado un gran éxito a la fecha en el ámbito de manufactura industrial. Los brazos robóticos pueden moverse con gran velocidad y precisión y realizar tareas repetitivas como son soldadura y pintura. Sin embargo, a pesar de todo su éxito estos robots comerciales sufren de una desventaja fundamental, la “Falta de movilidad”.

Un robot móvil necesita un mecanismo de locomoción que le permita moverse, pero existen una gran variedad de formas de lograr esto. Existen robots a nivel investigación que pueden caminar, saltar, correr, deslizarse, patinar, nadar y volar. Muchos de estos mecanismos de locomoción han sido inspirados por sus contrapartes biológicos. La única excepción ha sido las ruedas motorizadas, las cuales son un invento meramente humano que alcanza una gran eficiencia en terrenos planos. La eficiencia de la locomoción basada en ruedas depende enormemente de la calidad del medio, particularmente la dureza y el nivel de planicidad del entorno [17].

Los robots móviles usan tres tipos básicos de ruedas convencionales:

1. Ruedas fijas: en las cuales el centro de la rueda es un punto fijo en el marco donde la única rotación permitida es alrededor del eje horizontal.
2. Ruedas centradas orientables: Permiten el movimiento del plano de la rueda alrededor de un eje vertical que pasa a través del centro de la rueda. La orientación por lo general es activa.
3. Ruedas auto-orientables no centradas, también conocidas como ruedas castores que están orientadas con respecto al marco a pesar de que el plano de la rueda gira alrededor del eje vertical que no pasa por el centro de la rueda. Si la rueda no está adecuadamente dirigida, una fuerza tangencial aparece a cierta distancia del centro de la rueda y da lugar a un torque que orienta el plano de la rueda en dirección de la fuerza tangencial, evadiendo el deslizamiento lateral [18].

Los robots móviles con ruedas pueden ser clasificados como sistemas no holonómicos. Un sistema no holonómico es aquel sistema cuyo modelo cinemático contiene derivadas en el tiempo de las coordenadas generalizadas (variables) siendo estas no integrables. Otra forma de comprobar que no es un sistema holonómico es debido a que tiene menos grados de libertad controlable que el número total de grados de libertad presentes en la suspensión. Para un vehículo como lo es la suspensión presentada en esta tesis presenta tres grados de libertad, dos de posición y uno de orientación. Y se controla por medio de dos actuadores utilizando una dirección tipo diferencial.

1.3. Locomoción de robots móviles

La movilidad en terrenos no estructurados debe ser elegida de acuerdo con los obstáculos que se encontrará el robot móvil. Sin embargo, es difícil saber a qué tipo de terrenos se enfrentará un robot explorador, por lo que desarrollar un sistema de locomoción robusto ha sido un reto tecnológico por resolver.

Probablemente el enfoque mejor adaptado para la locomoción en un terreno no estructurado es aplicar las ventajas de las ruedas y combinarlas con un mecanismo de suspensión pasivo o activo apropiado [16]. El modelo de suspensión pasiva más utilizado es el denominado *Rocker-Bogie* (Figura 1.1), el cual tiene características significativas, entre las que destaca la habilidad de mantener las seis ruedas siempre en contacto con el terreno desigual. Otro punto a favor de esta suspensión es la facilidad de ser modelado.

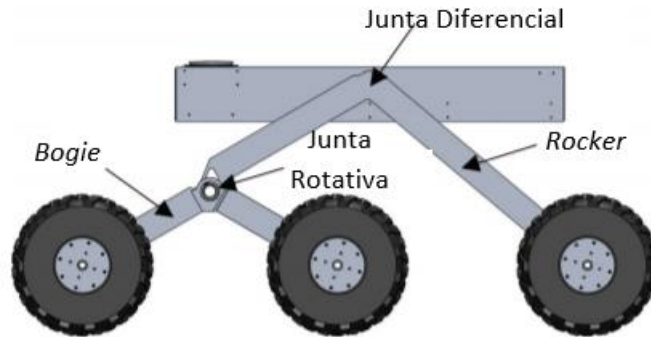


Figura 1.1. Ejemplo Suspensión Rocker-Bogie [19].

Aprovechando la Figura 1.1 se definirán los eslabones *Rocker* y *Bogie* que serán conceptos que se mencionarán varias veces a lo largo de este trabajo. El eslabón llamado *Rocker* es el eslabón que se conecta a la plataforma de carga por medio de un mecanismo diferencial, en uno de sus extremos se ensambla una llanta y en el otro extremo se conecta el eslabón *Bogie*, el cual llevará dos llantas en sus extremos. El eslabón *Bogie* se ensambla al *Rocker* mediante una junta rotativa entre el *Bogie* y el *Rocker* el cual le permite adaptarse al terreno de manera pasiva.

En la literatura se han encontrado trabajos donde se utilizan las ventajas del diseño más común de suspensión pasiva *Rocker-Bogie* además de conceptos y fórmulas de *Terramechanics* para generar un mapeo de los torques estimados para cada rueda y conocer los costos energéticos para atravesar terrenos con diferentes propiedades como lo hace David Michel *et al* [20]. **Terramechanics** es la rama de la mecánica que hace referencia al estudio de la interacción de las ruedas de un vehículo con el suelo en el que está en contacto.

1.3.1. Combinación de sistemas de locomoción

También se encuentra en la literatura la combinación de dos sistemas de locomoción: de orugas y la suspensión *Rocker-Bogie*. De esta combinación se creó un robot llamado *Rocker-Pillar* [21], el cual es capaz de subir escalones sin lado frontal utilizando la oruga que tiene incorporada, mantener un nivel de vibración bajo al atravesar terrenos no uniformes, modificando la posición de la oruga para que solo tenga un punto de contacto con el suelo, como lo muestra la Figura 1.2 (a). Cuando la suspensión requiere pasar a través de un bache la posición de la oruga gira para que toda la oruga este en contacto con el suelo como se muestra en la Figura 1.2 (b). El robot *Rocker-Pillar* de acuerdo con la definición de sistema pasivo y activo puede considerarse un sistema combinado entre ser pasivo gracias a la configuración *Rocker-Bogie* y un sistema activo debido al actuador que controla la posición de la oruga. Sin la combinación de estos dos sistemas, el robot no podría lograr las metas que un solo sistema por si solo alcanza. Sin embargo, el control y la complejidad del sistema aumentan.

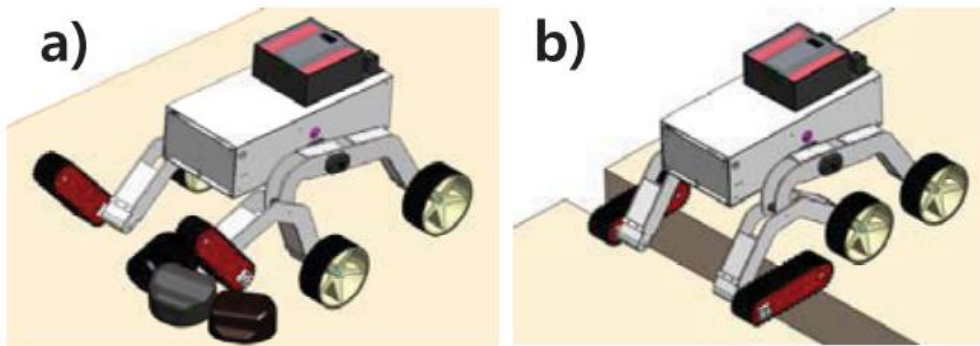


Figura 1.2. *Rocker-Pillar*: (a) oruga con un solo punto de apoyo. (b) oruga desplegada para atravesar hoyos. [21].

En la literatura no solo se encuentran robots basados en ruedas, orugas o piernas, también se pueden encontrar robots tan complejos como lo es el presentado por Zirong Luo, llamado *RHMBot* [22]. Este robot cuenta con tres modos de locomoción para adaptarse al entorno. Su sistema de locomoción comprende dos mecanismos de cuatro barras llamado *Watt II six bars linkage*. El mecanismo se encuentra plegado dentro de la llanta del robot y es actuado por un solo motor. La rueda cuenta con una banda de tracción alrededor, la cual es capaz de deformarse cuando el terreno requiera desplegar el mecanismo. Para encontrar la longitud necesaria de la banda de tracción fue necesario realizar un análisis cinemático del mecanismo. El robot *RHMBot* cuenta con tres configuraciones: cuando se encuentra en un terreno parejo su marco permanece plegado dentro de la rueda (Figura 1.3 a)), para terrenos complicados y obstáculos mayores, el marco se expande por completo ayudando al robot a subir obstáculos (Figura 1.3 b)) y si el obstáculo es mucho mayor su marco se reconfigura en forma triangular haciendo girar todo el triángulo para ser capaz de sobrepasar estos obstáculos (Figura 1.3 c)).

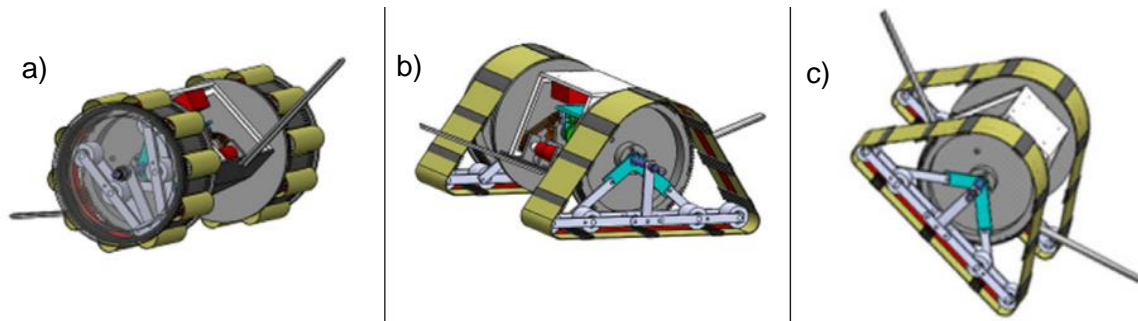


Figura 1.3. RHMBot: a) modo rueda. b) modo extendido. c) modo subir obstáculos [22].

Otro ejemplo de combinación de sistemas es el robot *RT-Mover* [3], el cual utiliza el sistema de piernas en conjunto con las ruedas. Esta combinación hace posible la adaptación del entorno por medio de las piernas y entre sus principales características están alta movilidad en terrenos accidentados, alta velocidad de movilidad gracias a las ruedas. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentran que el número de actuadores utilizado para las piernas incrementa el costo y la complejidad de controlarlas, y el peligro existente de que las piernas choquen con algún objeto o persona dentro de su rango de movimiento. A pesar de que los sistemas de locomoción basados en piernas normalmente son muy complejos debido a los grados de libertad que se requieren para cada pierna, el *RT-Mover* es relativamente sencillo (Figura 1.4). Utiliza cuatro motores, uno para cada rueda y otros cinco motores para cada eje que le da movimiento a las “piernas” del robot, estos 9 actuadores lo hacen muy estable al recorrer terrenos no uniformes y sobrepasar obstáculos.

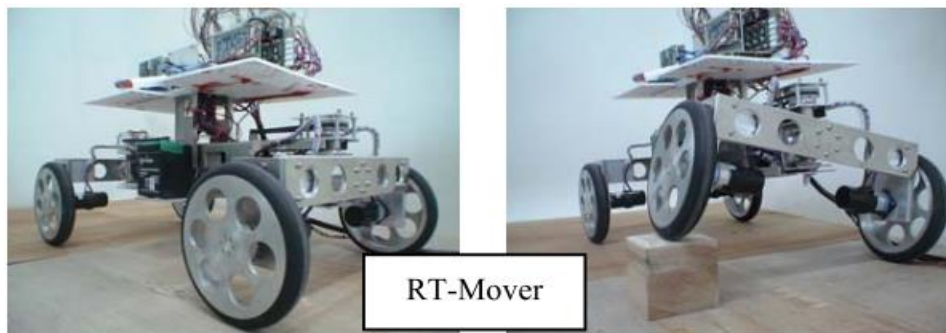


Figura 1.4. Robot RT-Mover [3].

A pesar de que las combinaciones de sistemas pueden ser muy eficientes, sin lugar a duda los sistemas de locomoción más utilizados y desarrollados son los sistemas basados en ruedas. Una prueba de ello son los robots desarrollados por la NASA para sus viajes espaciales *Rocky IV*, *Sojourner*, *Curiosity*, etc. Es por esto por lo que aún se siguen desarrollando investigaciones en los sistemas de locomoción basados en ruedas.

1.3.2. Locomoción basada en ruedas

A continuación, se presentan algunos trabajos encontrados en la literatura sobre sistemas basados en ruedas.

Uno de los robots encontrados en la literatura que utiliza el sistema basado en ruedas y una suspensión pasiva es el llamado *SHRIMP* [23] (Figura 1.5). El diseño de este robot está basado en los *Rovers* actuales, pero su principal diferencia es la arquitectura paralela de su suspensión, lo que crea una pendiente suave en su centro de gravedad al momento de sobrepasar obstáculos, (escalones, piedras, etc.). Otra característica de este robot es su capacidad de pasar por escalones o piedras mayores a 1.5 veces el diámetro de sus ruedas. La horquilla ubicada en frente del robot cumple con dos funciones:

- Garantizar el contacto óptimo de todas las ruedas del robot con el suelo.
- Proveer máxima amplitud vertical para la rueda.

Los *bogies* son una clave esencial del *SHRIMP* ya que para solucionar el problema de bajar el pivote (en el cual giran libremente los *bogies*) sin sacrificar distancia del suelo que pueda llegar a bloquear el robot a la hora de sobrepasar un obstáculo, es por esto por lo que se utilizó la arquitectura paralela.

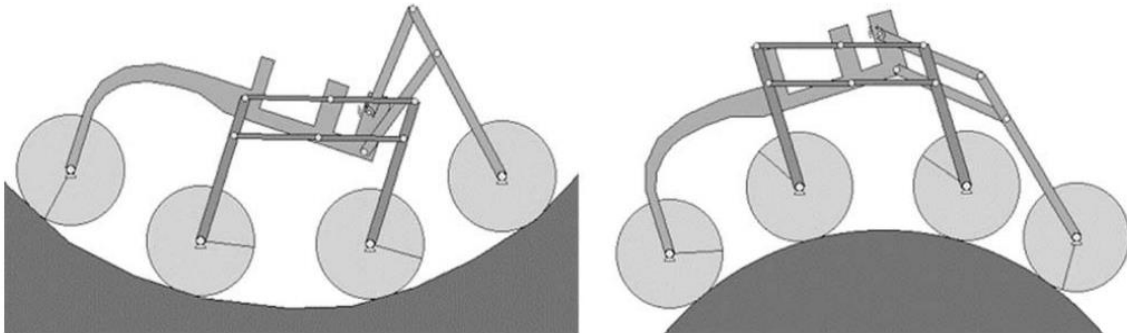


Figura 1.5. Robot *SHRIMP* [23].

Otro robot encontrado en la literatura es el robot *OCTOPUS* [24] (Figura 1.6), el cual utiliza un sistema basado en ruedas y es una suspensión activa. *OCTOPUS* es capaz de sobrepasar obstáculos autónomamente sin quedar atascado; para lograr esto el robot cuenta con ruedas táctiles, sensores de inclinación, 8 ruedas motorizadas y un total de 15 grados de libertad de los cuales 14 están motorizados. Las ruedas táctiles fueron diseñadas usando 16 sensores infrarrojos que miden la deformación causada por las fuerzas de contacto con el suelo. Esta medición da una aproximación de las fuerzas normales que están actuando en la rueda. El diseño mecánico de la rueda permite que los sensores estén fijos mientras la rueda gira esto es una gran ventaja a la hora de controlar el sistema. Como se observa en este robot cumple muy bien con la navegación autónoma en terrenos no estructurados, pero la complejidad del control del sistema es muy alta lo que incrementa el costo del robot. Sin embargo, lo que realiza este robot también puede ser realizado por robots que utilizan el sistema basado en ruedas, pero pasivo, como lo es el Robot *SHRIMP* [23], mencionado anteriormente o el robot *Sojourner* el cual utiliza una suspensión del tipo *Rocker-Bogie* [19].



Figura 1.6. Robot OCTOPUS [24].

Otro ejemplo encontrado en la literatura es una plataforma omnidireccional que utiliza una configuración de suspensión tipo *Rocker-Bogie* [25]. Esta plataforma tiene la intención de usarse para sillas de ruedas. La mayor ventaja de esta plataforma es su movimiento omnidireccional. El movimiento omnidireccional es provisto por dos pares de ruedas con dos grados de libertad por lo que es posible generar tres grados de libertad incluyendo rotación alrededor del origen del robot, de esta manera la plataforma se puede mover a cualquier posición en cualquier dirección. La plataforma será usada en un medio urbano por lo que se encontrará con obstáculos los cuales deberá sobrepasar. Para sobrepasar obstáculos se requiere una suspensión, por lo que los investigadores utilizaron la configuración *Rocker-Bogie* como se puede observar en la Figura 1.7. Aunque el objetivo principal de la plataforma es la movilidad omnidireccional que en si ya es un sistema complejo, la suspensión *Rocker-Bogie* permitió no incrementar más la complejidad del sistema, y debido a su gran confiabilidad al usar pocos componentes también redujo la tarea de manufactura del robot.

Como se puede observar en esta revisión de literatura, la simplicidad de las suspensiones pasivas combinadas con sistemas un poco más complejos puede ayudar a resolver grandes problemas, sin incrementar la dificultad de controlar el componente, la fabricación, etc. Debido a esto, las aplicaciones que se le pueden dar a las suspensiones pasivas tienen un amplio rango de aplicación.

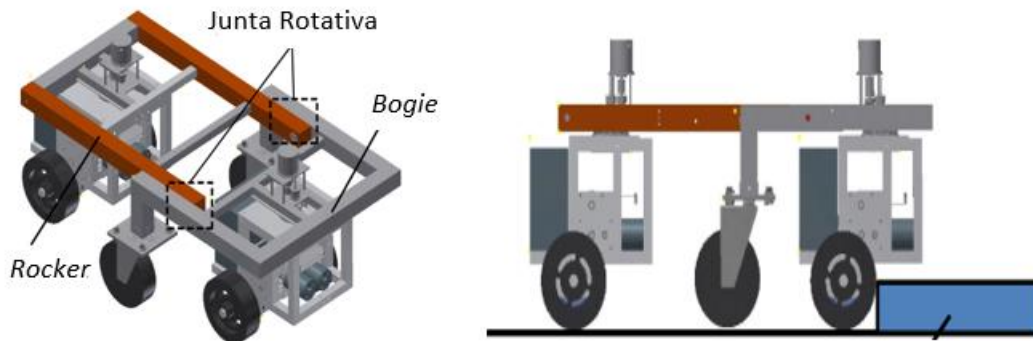


Figura 1.7. Plataforma omnidireccional [25].

1.3.4. Análisis de sistemas basados en ruedas

Existen un gran número de configuraciones para los robots móviles que utilizan ruedas. La configuración de cuatro ruedas es la más popular y sigue siendo utilizada haciendo uso de modificaciones para competir contra la tradicional *Rocker-Bogie*. El análisis dinámico y estructural para un robot móvil de cuatro ruedas con un movimiento *flip-flop* ha sido reportado por H. Saygin et al [26].

Al tener las suspensiones pasivas un amplio campo de aplicaciones, en la literatura se encuentran distintos tipos de análisis como lo es el análisis de la capacidad de subir escaleras [27] de las suspensiones *Rocker-Bogie*, determinando las longitudes de los eslabones para atravesar ciertos escalones con ciertas dimensiones.

Las métricas que se analizan para que una suspensión *Rocker-Bogie* sea capaz de subir una escalera, son los siguientes:

- El ángulo de contacto entre el centro de masa y el suelo, el cual está muy relacionado con la volcadura del robot.
- Que haya un estado en el que las tres ruedas estén tocando la cara frontal de la escalera.

No es fácil tener la suficiente fuerza normal para subir una escalera cuando la llanta de la suspensión toca la cara frontal de la misma. Es por esta razón que se han realizado varias investigaciones para mejorar la capacidad de subir escaleras.

En [27] se analiza la capacidad para subir escaleras de las suspensiones *Rocker-Bogie*, generando una gráfica *SCG (Stair Climability Graph)*, considerando que cuando el eslabón de la rueda trasera tenga un ángulo mayor a 90 grados el robot es incapaz de subir el escalón debido a que el momento generado por el centro de masa hará que el robot se vuelque. Otro motivo para hacer que un robot sea incapaz de subir por las escaleras es cuando la longitud del escalón es demasiado pequeña que ocasione que las tres ruedas toquen la parte frontal del escalón al mismo tiempo, lo que produce la suficiente fuerza normal para sobrepasar la escalera. Las conclusiones de este trabajo son que entre más largo sean los eslabones de la suspensión *Rocker-Bogie* mejor es su capacidad para subir escalones. Para aumentar la capacidad de subir escalones de una suspensión *Rocker-Bogie* es necesario modificar la longitud de sus eslabones y los radios de sus llantas. La gráfica (SCG) nos indica que longitud de eslabones y que radio de llantas nos permite subir ciertos tipos de escaleras sin volcar.

Las configuraciones *Rocker-Bogie* son las más utilizadas debido a su eficiencia y su sencillez. Se han utilizado en diferentes aplicaciones y existen diferentes variantes que utilizan el mismo principio de funcionamiento. Gracias al amplio rango de aplicaciones y al buen desempeño presentado por los sistemas de locomoción basados en ruedas, específicamente las suspensiones *Rocker-Bogie*, pocas veces se encuentran parámetros comparativos, iguales o similares entre ellos que den una idea del rendimiento que se puede esperar de cada suspensión.

En [28] se compararon los parámetros importantes a la hora de seleccionar el diseño de un *rover* como lo son la fricción mínima requerida para evitar el deslizamiento de sus llantas, el requerimiento de torque, e introducen un nuevo parámetro llamado la "violación de

restricción de velocidad” (*VCV* por sus siglas en inglés) que es la medida del riesgo que existe de que la velocidad se desvíe de la velocidad ideal para que no exista deslizamiento. El estudio se realizó para 3 configuraciones de suspensiones encontradas en la literatura: *Rocker-Bogie*, *RCL-E*, *CRAB*, siendo el sistema *Rocker-Bogie* el sistema de referencia debido a su exitoso uso en misiones espaciales. Los resultados muestran que la configuración *Rocker-Bogie* presenta la menor fuerza de fricción seguida de la configuración *CRAB* y la configuración *RCL-E* con movimiento hacia atrás es decir haciendo avanzar la llanta de su *rocker* primero. En el caso del torque se observó que el menor torque corresponde al *Rocker-Bogie* seguido del *CRAB* y por último el *RCL-E*. En el caso del parámetro *VCV* se encontró que el *CRAB* era el que menor cambio tenía seguido de la configuración *RCL-E* y por último la configuración *Rocker-Bogie*.

Aunque la suspensión *Rocker-Bogie* tiene muchas aplicaciones, una de las más utilizadas es en robots exploradores, el cual es el campo de aplicación donde se encuentran los mayores avances relacionados a esta suspensión. El primer robot explorador enviado a marte es el llamado *Sojourner* [29], el cual aterrizó en marte el 4 de julio de 1997. La suspensión en la que está basada este robot es el *Rocky 4*, el cual utiliza una suspensión pasiva *Rocker-Bogie* que puede atravesar obstáculos del diámetro de la llanta (13 cm). El reto para este robot no solo fue el sistema de suspensión, los ingenieros tuvieron que desarrollar diferentes dispositivos y herramientas para que el robot fuera totalmente funcional. Entre las diferentes funciones que requiere el robot para ser funcional encontraron como fundamentales las siguientes:

- Navegación a bordo y localización del robot desde el lugar de aterrizaje hasta su punto actual.
- Detección de peligro y evasión de éste.
- Movilidad adecuada para terreno de arena con muchas rocas pequeñas y algunas otras más grandes.
- Planeación para atravesar el terreno basado en imágenes mostradas al centro de control en tierra.

A partir de estas funciones, los ingenieros se dieron cuenta que muchos componentes del robot fueron reconocidos como retos tecnológicos.

Otro de los primeros robots en utilizar esta suspensión (*Rocker-Bogie*) y que está basado en sus predecesores que fueron enviados a marte es el prototipo llamado *Rocky 7* [30]. El robot *Rocky 7* fue pensado para superar las limitaciones del *Sojourner*.

- Incrementar la autonomía del robot, para incrementar los experimentos científicos que se pueden realizar.
- Poder recorrer grandes distancias, integrando sensores que determinen la orientación del robot. Integrar un poste con una cámara para poder enviar imágenes panorámicas a tierra.
- Integrar instrumentos científicos.

- Desarrollar una interfase basada en internet para que los científicos puedan realizar experimentos, y el público en general pueda ver las imágenes transmitidas por el Rover.

El sistema de locomoción utilizado en el robot *Rocky 7* es una modificación del *Rocker-Bogie* utilizado en *Rover's* anteriores de *JPL (Jet Propulsion Laboratory)*. *Rocky 7* consiste en dos *rockers* (de aquí viene su nombre *Rocky*) articulados con el cuerpo del robot. Cada *rocker* tiene una llanta dirigible en un extremo y en el otro extremo tiene otro *rocker* más pequeño al que son incorporadas dos ruedas. A diferencia de sus predecesores el *Rocky 7* solo tiene dos llantas dirigibles, las cuales pueden dirigir el *rover* como lo hacen los automóviles. Dos llantas dirigibles ayudan a reducir el número de actuadores; sin embargo, esto restringe la capacidad del robot para girar.

El *Rocky 7* tiene implementado un brazo manipulador de dos grados de libertad. El brazo incrementa el alcance del robot, sin embargo, añade complejidad al sistema, es por esto que se decidió dirigir solo dos ruedas. El brazo fue colocado en la parte frontal del robot mide 32 cm de largo y fue diseñado para excavar y llevar muestras.

Como los robots exploradores enviados al espacio son los que más utilizan la suspensión *Rocker-Bogie*, se han desarrollado modelos mecánicos para resolver la cinemática inversa y la descripción del sistema de fuerzas quasi-estático, esto con el fin de conocer la respuesta que tendrán en el entorno donde serán usados. Los análisis ya mencionados se hicieron para el robot *Sojourner* y el *LSR-1* que son clases representativas de robot usados por la NASA y fueron generados en el Instituto tecnológico de Massachusetts (MIT) [31]. Tener estos modelos es de gran ayuda ya que se puede monitorear el deslizamiento de las ruedas con el terreno, también se puede monitorear el desplazamiento del robot al recorrer un terreno y se pueden probar diferentes configuraciones del robot.

También se encontró un análisis en [32] el cual tiene como objetivo analizar cuál de las 6 ruedas de una suspensión *Rocker-Bogie* tiene mejor capacidad de pasar por un obstáculo, es decir, cual rueda utiliza menos torque y es menos probable de hacer volcar el robot. Lo que se encontró en la simulación desarrollada en este estudio, es que la suspensión al moverse hacia adelante con la misma altura de obstáculo y ángulos iguales de contacto de las ruedas con la superficie, la llanta trasera tiene la mejor capacidad para escalar, la llanta de en medio es la que tiene la peor capacidad, y la llanta frontal es la que tiene una capacidad moderada.

1.3.5. Otros sistemas de locomoción

En la literatura se encuentran diferentes soluciones para algunos de los problemas que se pueden encontrar en un robot móvil basado en ruedas. Tahrakeshwar Appala et al [33] utilizan una suspensión doble basada en un mecanismo de cuatro barras (*D4Bar*). El trabajo presentado resuelve uno de los problemas que enfrentan los robots móviles basados en ruedas, el deslizamiento de las llantas al atravesar obstáculos. El deslizamiento es causado debido a que el eje de las ruedas está fijo al armazón del robot y se inclina junto con la rueda por lo que se pierde contacto con la superficie. La suspensión *D4Bar* le agrega dos grados de libertad al eje de la llanta y se reporta una gran reducción del deslizamiento en simulación.

Otro ejemplo de robot móvil basado en ruedas con una configuración compleja es el *Wheel-Arm Robot* [34] mostrado en la Figura 1.8, el cual es un robot manipulador con cinco grados de libertad que utiliza dos ruedas motrices y una rueda pasiva de soporte. El robot presentado tiene dos modos de trabajo: el modo de movilidad que cuenta con dos ruedas motrices y una rueda pasiva sobre el suelo, y el modo de manipulación que es cuando el robot se levanta sobre la superficie plana de una de las ruedas motrices. El brazo robótico le da la habilidad de atravesar obstáculos haciendo uso de sus juntas activas. *Wheel-Arm Robot* está pensado para trabajar en una configuración multi-robot donde dos robots pueden ser conectados y dependiendo de cómo sea la conexión existen hasta 5 configuraciones que mejoran la movilidad o incrementan la capacidad de la zona de trabajo del robot.



Figura 1.8. Wheel arm robot [33].

Siguiendo con las configuraciones multi-robot se encuentra el robot llamado *Imobot* [35] mostrado en la Figura 1.9, el cual cuenta con 4 grados de libertad controlables y puede ensamblarse en un cluster que es capaz de obtener diferentes tipos de locomoción como lo es arrastrarse, girar u obtener una configuración que lo haga caminar como si tuviera piernas.

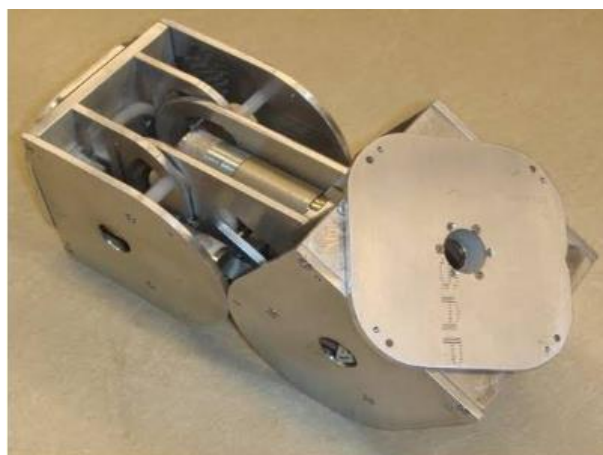


Figura 1.9. Imobot [35].

Según Roh *et al* [2] utilizan un sistema llamado *Multilayered Suspension*, el cual hace uso de resortes y amortiguadores. La suspensión propuesta es para uso en robots móviles demasiado altos en donde la mínima inclinación puede parecer demasiada debido a la altura del robot. El mecanismo del *Multilayered Suspension* es mostrado en el diagrama de la Figura 1.10, son dos ruedas libres acopladas a un cilindro unidireccional y un resorte de retorno, además de un resorte de retorno principal, un marco superior y un marco inferior. Las ruedas libres con todos y sus componentes están fijos al marco inferior, el marco superior ensamblado con el cuerpo del robot está a su vez acoplado al marco inferior.

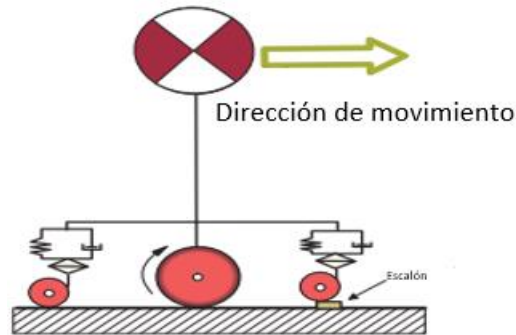


Figura 1.10. Diagrama *Multilayered suspension* [2].

El principio de funcionamiento es el siguiente: suponiendo que el centro de masa del robot está inclinado por alguna irregularidad en el terreno, una de las ruedas libres que incluye el cilindro y el resorte estarán a compresión y la otra rueda libre estará a tensión, pero en el momento que no exista más esta inclinación actuará el resorte a compresión y le regresará su posición original amortiguado por el cilindro del lado que estaba a tensión. Los resultados muestran ángulos de inclinación menores a 6° . Además de absorber impactos, la suspensión también es capaz de regresar el robot a su posición original con mejor precisión que con un sistema complejo de control.

Otra manera de estabilizar la plataforma de carga es mediante el uso de dos actuadores para cada rueda [36]. El sistema hace uso del *cart-table model* que consiste en colocar un carro de masa m moviéndose en una mesa de masa despreciable con una base poligonal, en la cual se encuentra el punto de momento cero donde la suma de fuerzas es igual a cero. Utilizando este modelo y lógica difusa para el control se proponen cinco variables de entrada para controlar los dos actuadores que se encuentran en las estructuras de las ruedas. El motivo por el cual se utilizó la lógica difusa para el control es evitar el modelado dinámico como convencionalmente se hace.

Realizar el modelo dinámico de un robot móvil basado en ruedas puede ser de gran ayuda para analizar la estabilidad de volcadura del vehículo, como se reporta en [37]. Se utiliza un criterio de estabilidad llamado *Moment-Height Stability (MHS)*, el cual está basado en los momentos estabilizadores y desestabilizadores ejercidos en la base móvil, y ha sido desarrollado para medir la estabilidad de la volcadura en manipuladores móviles con elementos rígidos. El robot móvil analizado es una plataforma móvil Stanford con dos manipuladores sobre su plataforma tipo PUMA 560. Primero se hizo el análisis dinámico de la base y de sus llantas por separado, y posteriormente se unieron ambos análisis utilizando el criterio mencionado anteriormente (*MHS*). Se consideraron dos casos de estudio: en el

primer caso el robot se mueve en una línea recta a través de un terreno no estructurado, y en el segundo el robot se mueve en una línea curva por un entorno no estructurado, reportando en que punto de ambos casos ocurre la volcadura bajo ciertos parámetros de velocidad, masa, coeficientes de los amortiguadores etc.

A pesar de que los sistemas activos reportados presentan buenos resultados se siguen buscando maneras de obtener los mismos o mejores resultados de maneras pasivas tal como se presenta en [38]. En este trabajo se utiliza un robot móvil de cuatro ruedas tipo *bogie*, y se observó que cuando una llanta esta sobre un obstáculo y las demás están sobre el suelo ocurre una inclinación de sus llantas lo que le da menos superficie de contacto y ocasiona deslizamiento. Derivado de esta observación se realizó un análisis cinemático del robot móvil al subir un obstáculo, y posteriormente se sintetizó un mecanismo que compensara esta inclinación haciendo uso de un sistema pasivo.

1.4. Robots con ruedas en terrenos accidentados o con obstáculos

Existen dos técnicas principales para permitir a los robots móviles con ruedas y sin piernas articuladas, moverse en terrenos no estructurados o con obstáculos:

Llantas poco infladas

Las llantas por sí mismas tienen cierta capacidad de superar obstáculos, lo que depende de dos parámetros: diámetro de la llanta y presión de inflado. La altura del obstáculo que la llanta es capaz de superar es proporcional al diámetro de esta; sin embargo, una llanta muy grande reduce la maniobrabilidad. Con respecto a la presión del aire, una presión muy baja permite la generación de fuerzas de contacto en la orilla de los obstáculos, pero en contraste la eficiencia es reducida drásticamente [39].

Racimos de ruedas

Un racimo de ruedas consiste en un set de ruedas montadas en una barra unida al chasis por medio de un eje que permite la rotación relativa. Esta rotación permite colocar las ruedas sucesivamente en los siguientes escalones o en la parte plana de un obstáculo. Las ventajas de los racimos son: buena eficiencia de rodadura, confort y estabilidad.

En este capítulo se revisaron los diferentes trabajos reportados en la literatura sobre robots móviles y sus respectivos sistemas de locomoción. En los trabajos revisados se encontró que las suspensiones se pueden clasificar en pasivas y activas, cada una con sus ventajas y desventajas. Se revisaron asimismo los sistemas de locomoción existentes hasta el momento, análisis de sistemas basados en ruedas, así como combinaciones de dos o más sistemas de locomoción para contrarrestar las desventajas de cada uno. Los trabajos revisados en este capítulo fueron fundamentales para entender y definir el sistema de locomoción de la suspensión desarrollada en esta tesis.

2

2. Síntesis y análisis cinemático de una suspensión pasiva para un robot móvil

La suspensión fabricada en este trabajo de tesis es una evolución del trabajo previo desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UASLP, la suspensión CIEP_1 (2011) [11]. El diseño de la suspensión CIEP_1 (2011), se derivó de la revisión y análisis de las características cinemáticas de algunos de los sistemas más comunes de suspensión basados en ruedas [40] [41], los cuales se muestran en la Figura 2.1. Al revisar las suspensiones existentes buscando la sencillez de su sistema de control y sus características cinemáticas, los sistemas con 8 ruedas y los sistemas de suspensión activos fueron descartados. Para el desarrollo de la suspensión CIEP_1 (2011) las suspensiones usadas fueron: la suspensión *MER* (probado en marte por la NASA), *RCL-C* [42] (seleccionada por *ESA Mars exploration*), y la suspensión *CRAB II* [43] (desarrollada por el laboratorio de sistemas autónomos EPFL).

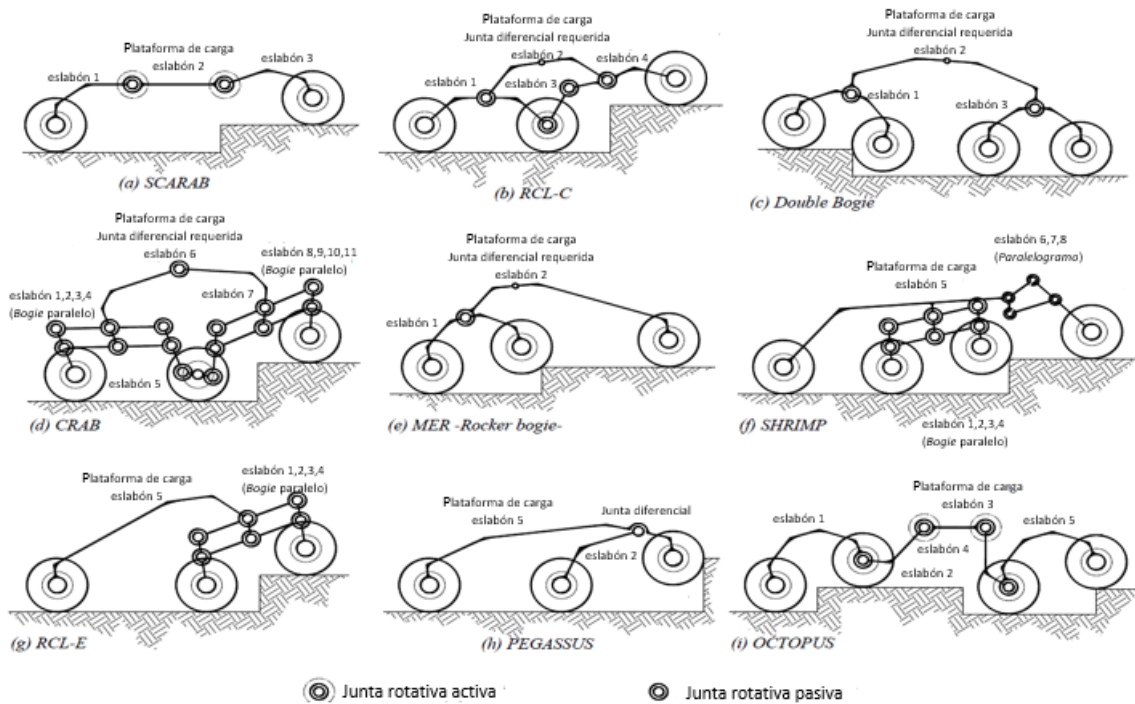


Figura 2.1. Esquema de suspensiones basadas en ruedas: (a) Suspensión *SCARAB*, (b) Suspensión *RCL-C*, (c) suspensión *Double Bogie*, (d) suspensión *CRAB*, (e) suspensión *MER*, (f) Suspensión *SHRIMP*, (g) Suspensión *RCL-E*, (h) Suspensión *PEGASSUS*, (i) Suspensión *OCTOPUS*, [11]

CIEP_1 (2011) utiliza el concepto del *Rocker-Bogie* o sistema *MER*, Figura 2.2. Combina el concepto de dos *Bogies* que comparten una rueda (rueda central) como lo hace el *CRAB II*, y acoplando estos dos *Bogies* por un eslabón (línea negra) que a su vez actúa como plataforma de carga que conecta el *Bogie* frontal (color rojo) con el *Bogie* trasero (color azul) a un deslizador. Lo novedoso de CIEP_1 2011 o 2020 es que se puede modificar la trayectoria a seguir del deslizador para compensar la horizontalidad de la plataforma de carga, como se verá en la siguiente sección.

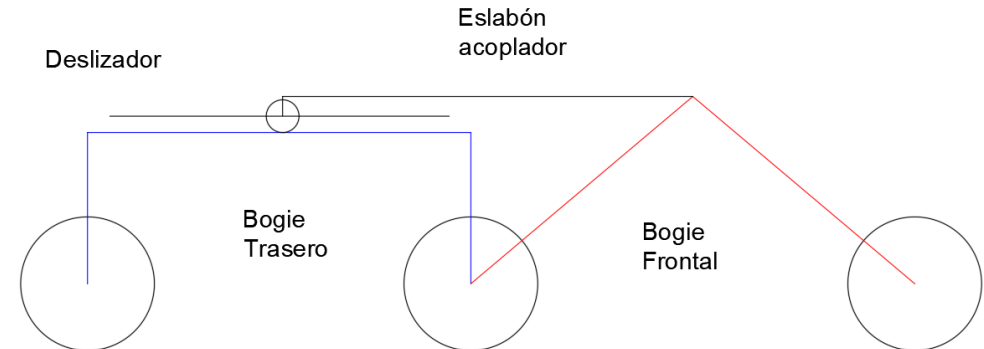


Figura 2.2. Esquemización primera propuesta CIEP_1 (2011).

2.1. Análisis cinemático suspensión CIEP_1 (2020)

El deslizador de la suspensión CIEP_1 (2011) debe ser modificado debido al cambio de dimensiones que se realizara al prototipo de la suspensión para compensar la horizontalidad de la plataforma de carga ya que las dimensiones serán reducidas. Sin embargo, para conocer cuál es la trayectoria que mantiene la plataforma de carga se tiene que realizar el análisis cinemático de la suspensión CIEP_1 (2011).

El análisis cinemático se realiza fijando un eje coordenado a la llanta trasera y acoplando un paralelogramo a la suspensión como se muestra en la Figura 2.3. Los círculos representan las llantas, el eje coordenado está en la llanta trasera y el eslabón $R3$ del paralelogramo es el que actúa como plataforma de carga. También se puede apreciar en la Figura 2.3 que la plataforma de carga se mantiene horizontal si el eslabón $R1$ se mantiene alineado al eje x . Sin embargo, como la suspensión recorrerá terreno no estructurado no se puede asegurar esta condición, por lo que se tiene que considerar un segundo grado de libertad para el paralelogramo (ϕ_1) como se muestra en la Figura 2.4, y restringir el eslabón $R3$ a ser siempre horizontal.

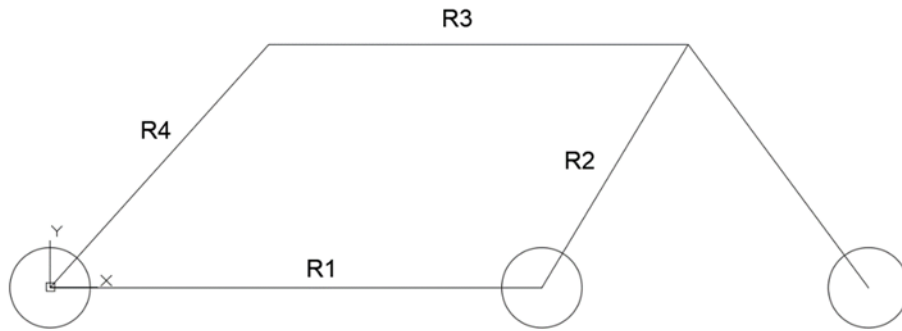


Figura 2.3. Paralelogramo acoplado a suspensión.

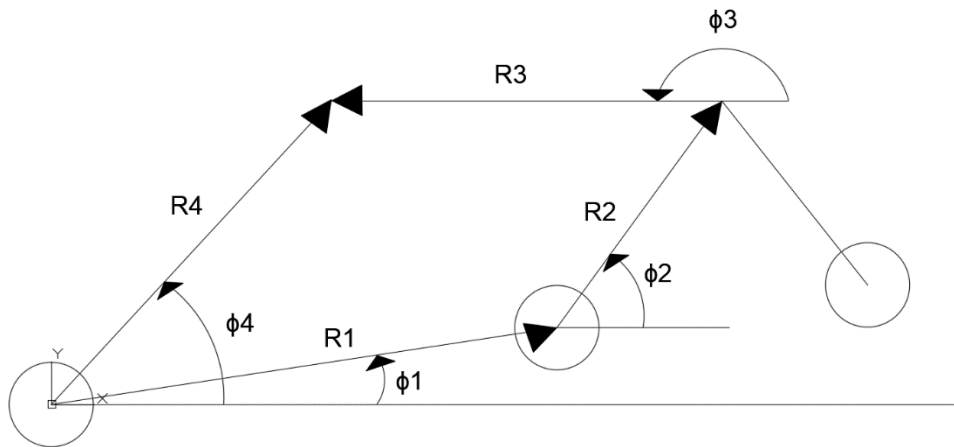


Figura 2.4. Paralelogramo acoplado a suspensión con dos grados de libertad.

Analizando el caso del paralelogramo de dos grados de libertad mostrado en la Figura 2.4, haciendo suma de vectores se puede obtener la siguiente ecuación:

$$R_1 + R_2 + R_3 - R_4 = 0 \quad (2.1)$$

donde R_1 es el vector que conecta la llanta trasera con la llanta central, R_2 es el vector que conecta la llanta central a la plataforma de carga, R_3 es la plataforma de carga, y R_4 es el componente faltante para cerrar el paralelogramo formado por los demás eslabones.

Las componentes en “x” de los vectores que forman el paralelogramo (R_1, R_2, R_3 y R_4) son:

$$R_1 \cos \phi_1 + R_2 \cos \phi_2 + R_3 \cos \phi_3 - R_4 \cos \phi_4 = 0 \quad (2.2)$$

Por otro lado, las componentes en “y” de los vectores que forman el paralelogramo (R_1, R_2, R_3 y R_4) son:

$$R_1 \sin \phi_1 + R_2 \sin \phi_2 + R_3 \sin \phi_3 - R_4 \sin \phi_4 = 0 \quad (2.3)$$

Despejando el término que contiene R_4 en ambas componentes:

$$R_4 \cos(\phi_4) = R_1 \cos(\phi_1) + R_2 \cos(\phi_2) + R_3 \cos(\phi_3) \quad (2.4)$$

$$R_4 \sin(\phi_4) = R_1 \sin(\phi_1) + R_2 \sin(\phi_2) + R_3 \sin(\phi_3) \quad (2.5)$$

Elevando al cuadrado las ecuaciones 2.4 y 2.5:

$$R_4^2 \cos^2(\phi_4) = R_1^2 \cos^2(\phi_1) + R_2^2 \cos^2(\phi_2) + R_3^2 \cos^2(\phi_3) + 2R_1R_2 \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) + 2R_1R_3 \cos(\phi_1) \cos(\phi_3) + 2R_2R_3 \cos(\phi_2) \cos(\phi_3)$$

$$R_4^2 \sin^2(\phi_4) = R_1^2 \sin^2(\phi_1) + R_2^2 \sin^2(\phi_2) + R_3^2 \sin^2(\phi_3) + 2R_1R_2 \sin(\phi_1) \sin(\phi_2) + 2R_1R_3 \sin(\phi_1) \sin(\phi_3) + 2R_2R_3 \sin(\phi_2) \sin(\phi_3)$$

Sumando las ecuaciones:

$$R_4 = [R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + 2R_1R_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + 2R_1R_3 \cos(\phi_1 - \phi_3) + 2R_2R_3 \cos(\phi_2 - \phi_3)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Restringiendo $\phi_3 = 180^\circ$ se reduce la ecuación (2.6) a:

$$R_4 = [R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + 2R_1R_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) - 2R_1R_3 \cos(\phi_1) - 2R_2R_3 \cos(\phi_2)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

ϕ_4 se resuelve despejando $\cos \phi_4$ y $\sin \phi_4$ de las ecuaciones 2.4 y 2.5 respectivamente y sustituyendo en la ecuación (2.8):

$$\phi_4 = 2 \arctan \left(\frac{\cos \phi_4}{1 - \sin \phi_4} \right) \quad (2.8)$$

Simplificando 2.8 se obtiene 2.9 de donde se obtiene ϕ_4 para poder trabajar en los cuatro cuadrantes.

$$\phi_4 = 2 \arctan \left(\frac{[R_1 \cos(\phi_1) + R_2 \cos(\phi_2) - 1]}{R_4 - (R_1 \sin \phi_1 - R_2 \sin \phi_2)} \right) \quad (2.9)$$

Se prueba el desempeño de R_4 para tres casos diferentes variando ϕ_1 y ϕ_2 de donde se obtendrá la trayectoria que tiene que seguir dicho eslabon para cumplir la restricción de horizontalidad.

El desarrollo de la suspensión CIEP_1 (2020) se realiza con el objetivo de construir y evaluar el funcionamiento de su predecesora (CIEP_1 2011) mostrada en la Figura 2.5. La nueva suspensión CIEP_1 (2020) será fabricada a base de manufactura aditiva. Las longitudes modeladas de su predecesor son demasiado largas para poder ser fabricadas en una impresora 3D convencional, por lo que se tienen que proponer las dimensiones considerando las restricciones del método de fabricación. Por lo tanto, se realiza un análisis de las dimensiones y sus afectaciones cinemáticas. El análisis se realiza modificando las

longitudes de los eslabones R_1, R_2, R_3, R_4 de la suspensión predecesora. Las longitudes propuestas para el análisis cinemático se muestran en la Tabla 2.1.

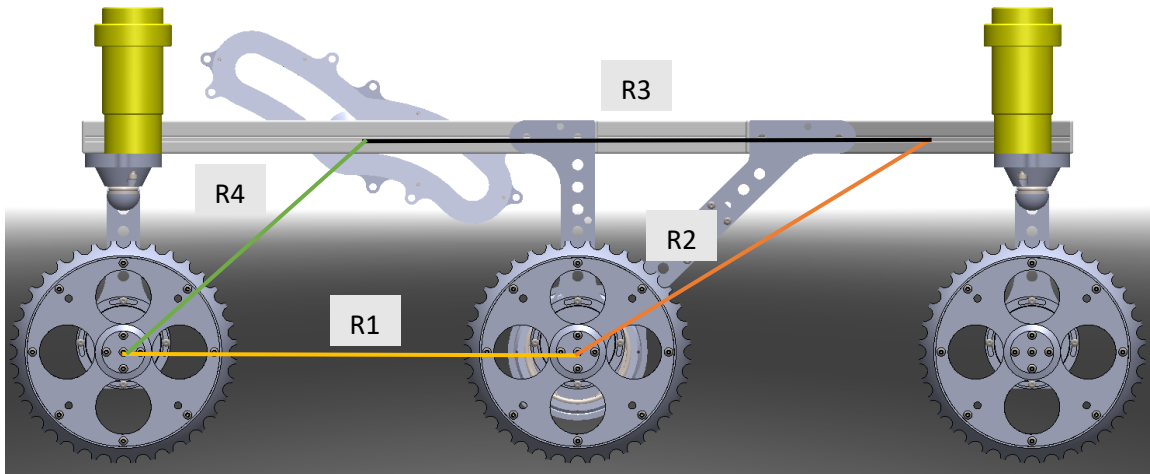


Figura 2.5. Suspensión CIEP_1 (2011) modelada en aluminio.

Tabla 2.1 Dimensiones de los eslabones analizados en simulación numérica para proponer longitudes finales.

Eslabón	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l
R1 (mm)	800	200	800	400	400	200	400	400	500	400	400	300
R2 (mm)	560	280	280	560	280	280	140	280	400	500	300	400
R3 (mm)	804	402	402	402	804	402	402	201	300	300	500	500

Al ser un paralelogramo acoplado a la suspensión, si las dimensiones de sus eslabones cambian también cambia su comportamiento. Todas las combinaciones de dimensiones generan una trayectoria; sin embargo, no todas las trayectorias son funcionales. La trayectoria generada es la trayectoria que debe seguir el extremo de la plataforma de carga para poder mantener la restricción de 180° ; Ya que de otra manera el eslabón R_4 tendría que incrementar o disminuir su longitud lo que se definió como un sistema activo lo que estaría fuera de los requerimientos de diseño. Las trayectorias que son funcionales son aquellas que permitan seleccionar dos o tres que se puedan combinar sin generar un cambio abrupto entre ellas. Las trayectorias generadas por las dimensiones de la Tabla 2.1 se presentan en Figura 2.6, Figura 2.7, Figura 2.8 y Figura 2.9. Se varían en un amplio rango los ángulos para conocer el mayor rango de trabajo de las trayectorias. Las curvas se identifican por colores: el color rojo representa cuando la llanta frontal sube y baja un obstáculo, el color verde representa cuando la llanta central sube y baja un obstáculo, el color negro representa cuando la llanta trasera sube y baja un obstáculo.

Analizando las trayectorias se observa que la trayectoria color negro toma la forma de un semicírculo con orientación casi vertical. La trayectoria color rojo es un semicírculo con centro en la llanta trasera. Modificando las dimensiones de los eslabones las trayectorias (roja y negra) cambia su posición y longitud. La trayectoria en color verde a diferencia de las otras dos genera una trayectoria irregular con cada cambio de dimensiones. Combinar dos trayectorias requiere de un cambio suave entre trayectoria y trayectoria. Se descarta para un sistema pasivo la trayectoria negra debido a su posición casi vertical ya que generaría un cambio abrupto en las otras dos trayectorias. Observando el comportamiento de la Figura 2.6 d), e), f), Figura 2.8 i) y Figura 2.9 j), l). se observa un cambio suave entre la trayectoria roja y verde por lo que las dimensiones propuestas deben tener un comportamiento similar. También se puede observar en la Figura 2.6 a) que la suspensión no puede ser escalada 2:1 debido a que la trayectoria color verde que adquiere una forma irregular y genera un cambio muy agudo en el punto coincidente entre la trayectoria roja y verde.

Entonces, para proponer las dimensiones de la suspensión CIEP_1 (2020), se tiene que considerar las longitudes analizadas y sus trayectorias. Para lograr una generación de trayectorias satisfactorias se consideran el caso l) de la Tabla 2.1. El caso l) indica que la dimensión del eslabón R1 debe ser de menor longitud y las otras dos dimensiones deben ser de mayor tamaño respectivamente una respecto a otra. Las dimensiones propuestas se modelan sin considerar ensambles entre componentes, pero se consideran las juntas requeridas y dimensiones que pueden ser fabricadas en una impresora 3D convencional. La suspensión modelada se muestra en la Figura 2.10 misma que será utilizada para simular el comportamiento del dispositivo deslizador sintetizado en esta sección. Las dimensiones propuestas para el nuevo prototipo se muestran en la Tabla 2.2. Como se puede observar el eslabón R3 es el de mayor tamaño mientras que los otros dos tienen medidas menores. En la sección 2.2 se mostrará el comportamiento de las dimensiones propuestas para la generación del dispositivo deslizador para su posterior diseño y validación.

Tabla 2.2. Dimensiones CIEP_1 modelada en aluminio vs dimensiones propuestas para impresión 3D.

Eslabones	CIEP_1 (2011) [11]	CIEP_1 (2020)
R1 (mm)	400	225
R2 (mm)	280	233
R3 (mm)	402	250
Ruedas (diámetro) (mm)	187	68

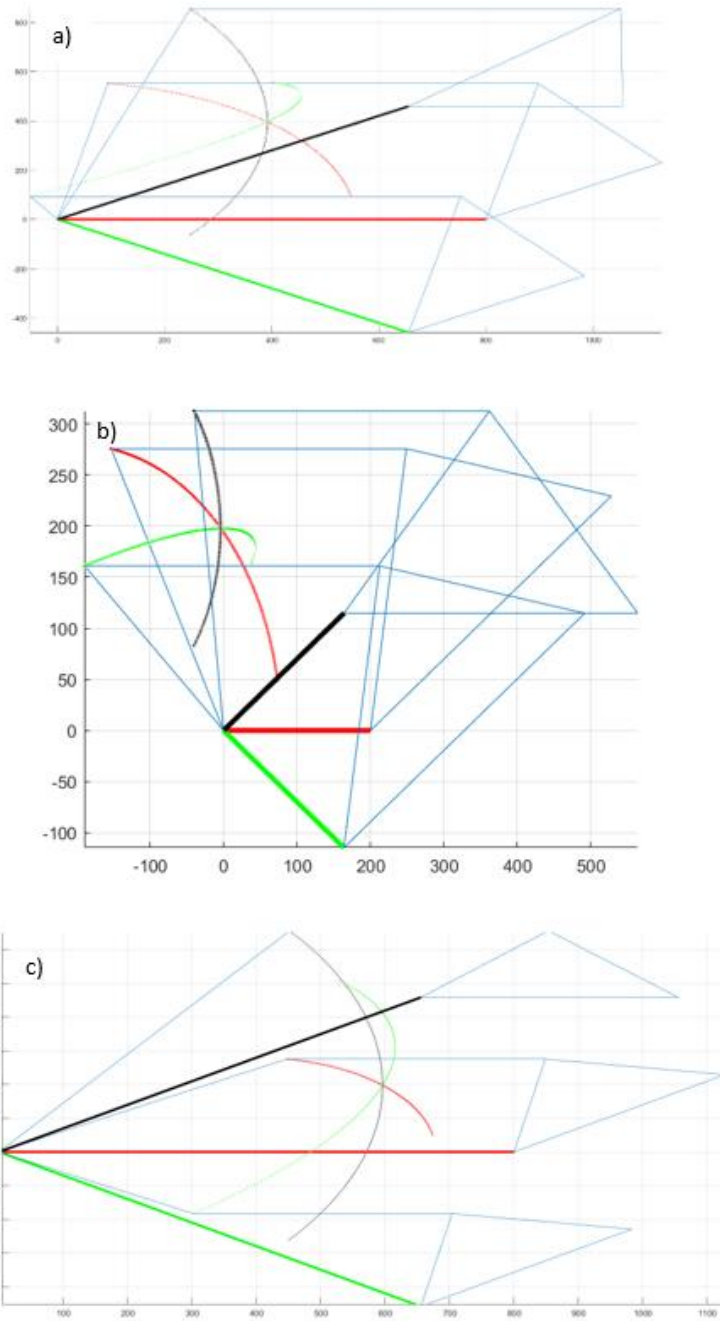


Figura 2.6 trayectorias generadas. a) todos los eslabones (escala 2:1), b) todos los eslabones (escala 1:2), c) Eslabón R_1 (escala 2:1).

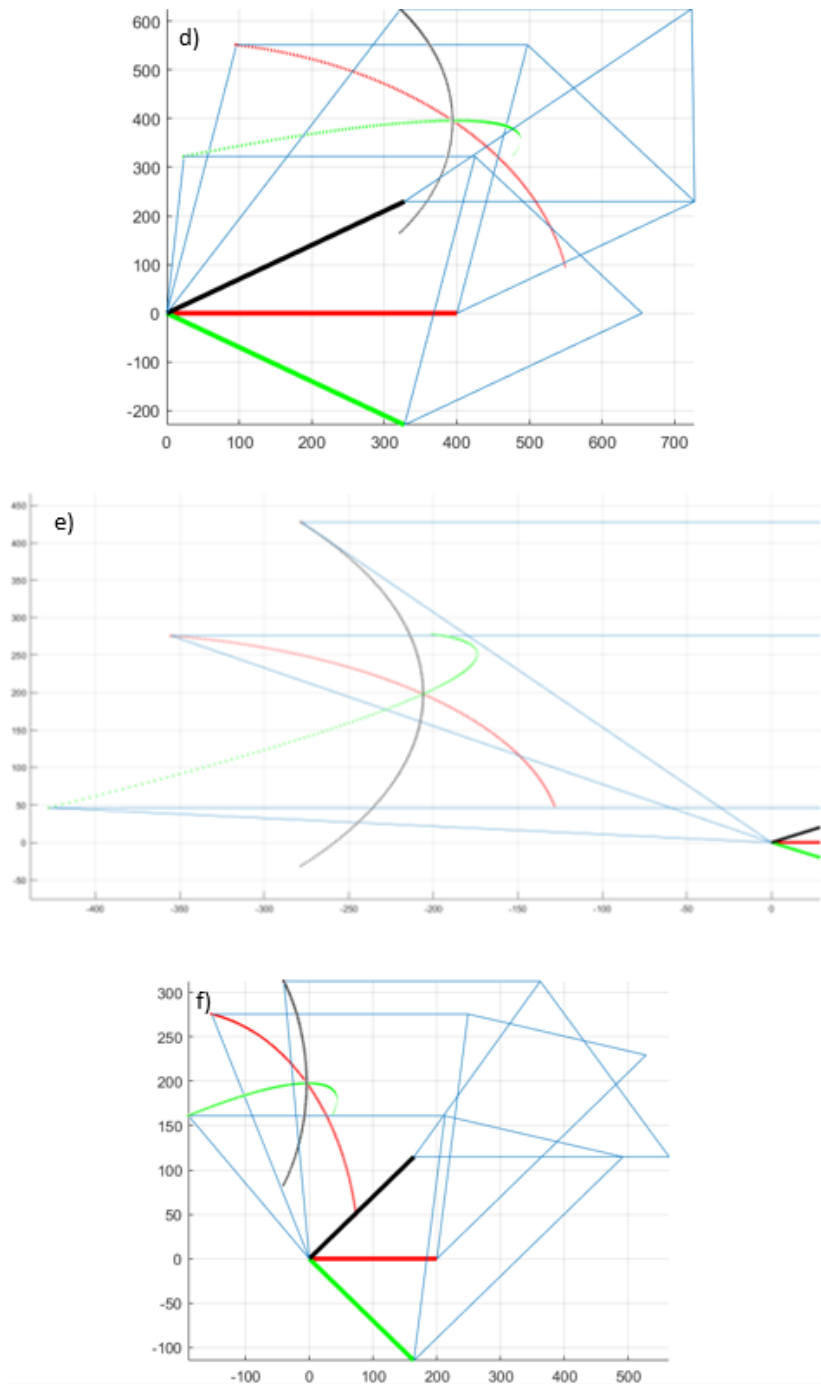


Figura 2.7 Trayectorias generadas. d) Eslabón R_2 (escala 2:1), e) Eslabón R_3 (escala 2:1), f) Eslabón R_1 (escala 1:2).

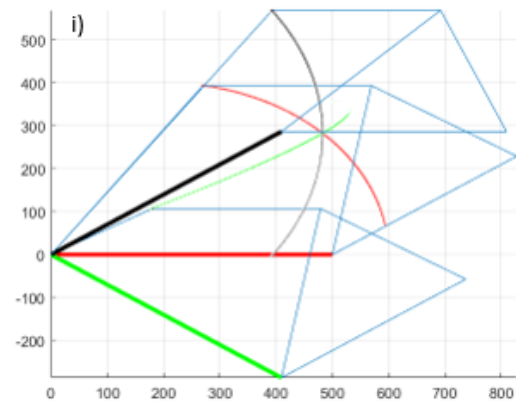
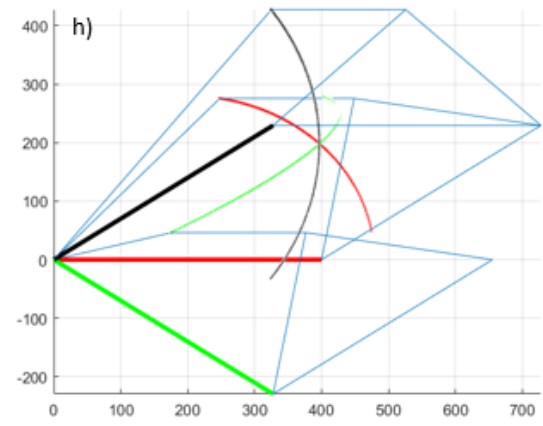
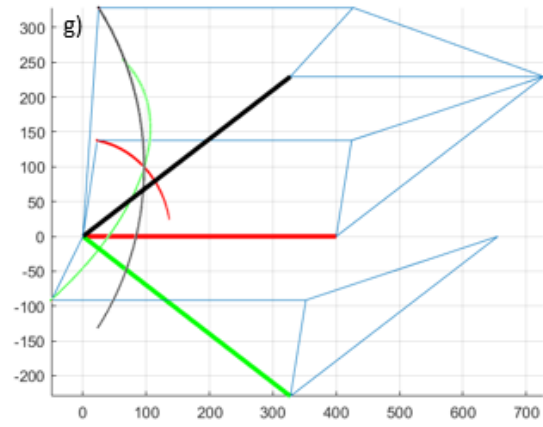


Figura 2.8 Trayectorias generadas. g) Eslabón R_2 (escala 1:2), h) Eslabón R_3 (escala 1:2), i) Eslabón R_1 mayor a los demás.

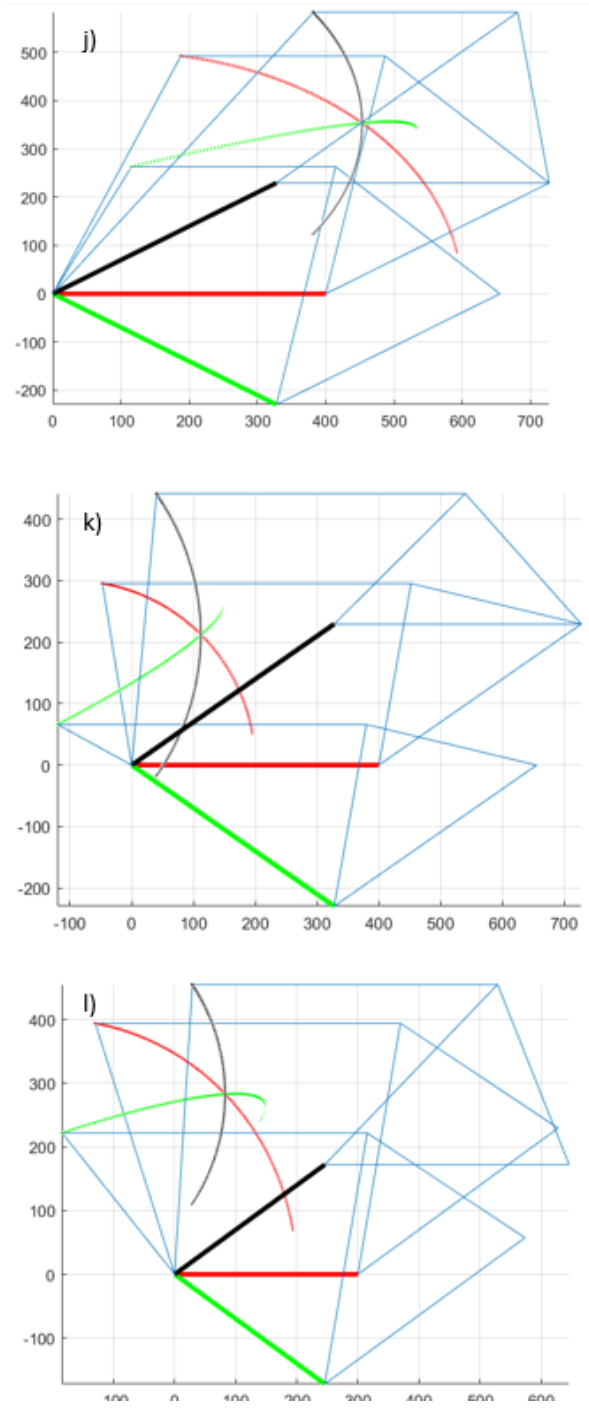


Figura 2.9 Trayectorias generadas. j) Eslabón R_2 mayor a los demás, k) Eslabón R_3 mayor a los demás y eslabón R_2 menor a los demás, l) Eslabón R_3 mayor a los demás y eslabón R_1 menor a los demás.

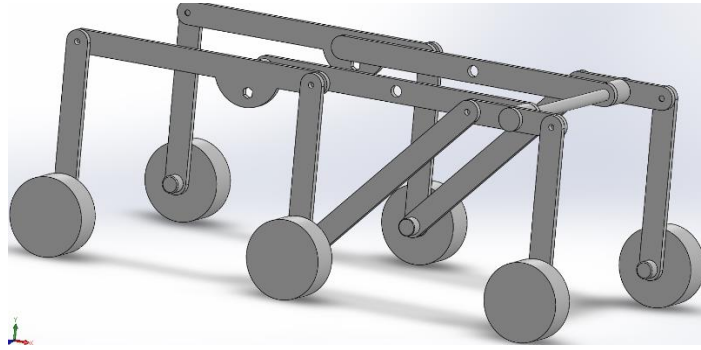


Figura 2.10. Suspensión propuesta simplificada.

2.2. Simulación numérica suspensión CIEP_1 (2020)

Una vez encontradas las ecuaciones de movimiento y las dimensiones del mecanismo, se procede a realizar la simulación numérica en el *software Matlab®*. La primera simulación se realiza con la condición de que $\phi_1 = 0$ y ϕ_2 es variable en un rango de 0 a 13 grados y de 0 a -13 grados. Este ángulo corresponde al ángulo que se inclina el eslabón R_2 para poder subir o bajar un obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas propuestas para la suspensión, simulando como si la llanta frontal subiera o bajara un obstáculo como se muestra en la Figura 2.11.

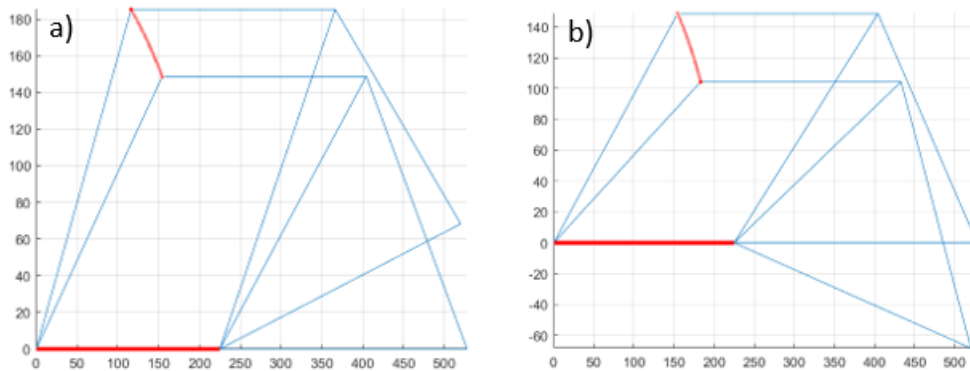


Figura 2.11. Simulación numérica paralelogramo: a) rueda frontal subiendo obstáculos $\phi_2 > 0$ b) rueda frontal bajando un obstáculo $\phi_2 < 0$.

La curva de color rojo de la Figura 2.11 representa la trayectoria que debe seguir la plataforma de carga (eslabón R_3) para mantener la condición de horizontalidad. Analizando la simulación, se encuentra que el eslabón R_4 necesita cambiar de longitud mientras atraviesa el obstáculo para que el eslabón R_3 pueda mantenerse horizontal.

La siguiente simulación que se realiza es con la condición de que $\phi_2 = -\phi_1$, con un rango de 0 a 13 grados y de 0 a -13 grados. Este ángulo corresponde al ángulo requerido por los eslabones R_1 y R_2 para poder subir o bajar un obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas propuestas para la suspensión, simulando de esta manera como si la llanta central subiera o bajara un obstáculo como se muestra en la Figura 2.12 al igual que la primera simulación se encuentra que el eslabón R_4 necesita cambiar de longitud mientras se atraviesa un

obstáculo para que el eslabón R_3 se mantenga horizontal. La curva de color verde de la Figura 2.12 representa la trayectoria que debe seguir la plataforma de carga (eslabón R_3) para mantener la condición de horizontalidad.

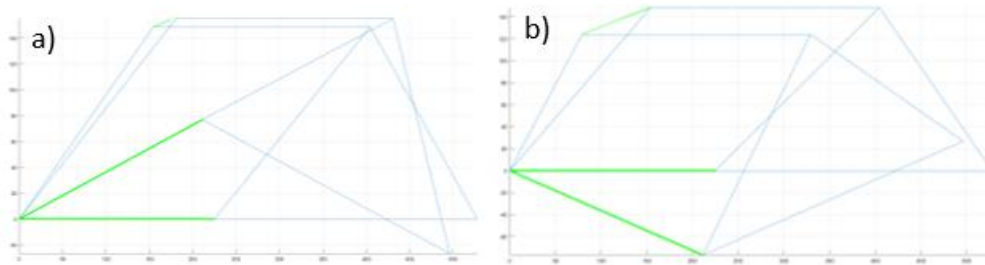


Figura 2.12. Simulación numérica paralelogramo: a) rueda central subiendo obstáculo. b) rueda central bajando obstáculo.

La siguiente simulación que se realiza es con la condición de que $\phi_2 = 0$ y ϕ_1 es variable, con un rango de 0 a -15 grados y de 0 a 15 grados, simulando con estas condiciones que la llanta trasera está bajando o subiendo un obstáculo como se muestra en la Figura 2.13. En esta tercera simulación se observa lo mismo que en las dos anteriores el eslabón R_4 debe de cambiar de longitud para mantener la horizontalidad de la plataforma de carga.

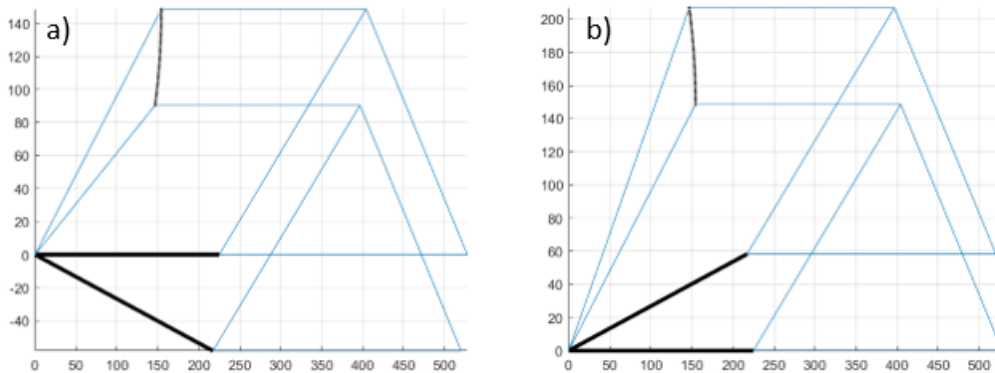


Figura 2.13. Simulación numérica paralelogramo: a) rueda trasera subiendo un obstáculo $\phi_1 < 0$ b) rueda trasera bajando un obstáculo $\phi_1 > 0$.

2.3. Evaluación y selección de casos para compensación de plataforma de carga

Una vez obtenidas las trayectorias para los casos a los que se puede enfrentar la suspensión CIEP_1 (2020), se procede a empalmar las trayectorias en un solo gráfico como se muestra en la Figura 2.14, de la figura se observa que para los tres casos (rueda frontal subiendo y bajando obstáculo, rueda central subiendo y bajando obstáculo, rueda trasera subiendo y bajando obstáculo) las tres trayectorias se cruzan en un punto en común, este punto es cuando las tres ruedas están sobre el suelo es decir $\phi_1 = 0$ y $\phi_2 = 0$.

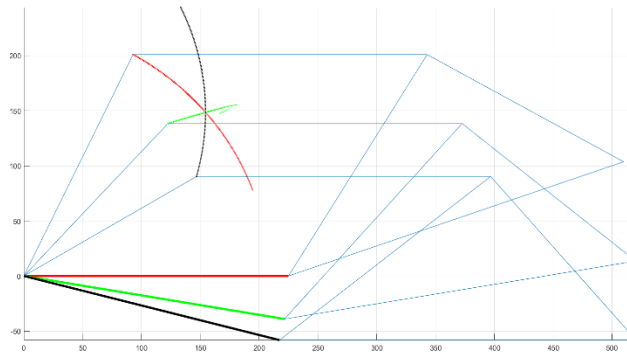


Figura 2.14. trayectorias empalmadas de los tres casos simulados.

Una vez conocidas las tres trayectorias se puede seleccionar una combinación de dos para compensar la plataforma de carga. Se puede observar de la Figura 2.14 que no se puede utilizar la trayectoria del caso 3 (curva color negro) ya que, si se combina con cualquiera de las otras dos, el mecanismo puede llegar a bloquearse debido al cambio abrupto entre las demás. Por lo que se debe trabajar con las trayectorias del caso 1 (curva color rojo) y del caso 2 (curva color verde) descartando de esta manera la compensación de la plataforma de carga cuando la llanta trasera sobrepase un obstáculo. Analizando las trayectorias y utilizando la misma lógica se procede a seleccionar la trayectoria del caso 1 (llanta frontal sube un obstáculo) combinada con la trayectoria del caso 2, (llanta central sube un obstáculo). De esta manera la trayectoria queda como se muestra en la Figura 2.15. En la Figura 2.16 se muestra un esquema de la trayectoria seleccionada en la suspensión CIEP_1 (2020). En la Figura 2.17 se muestra un acercamiento de las dos trayectorias seleccionadas para una mejor visualización.

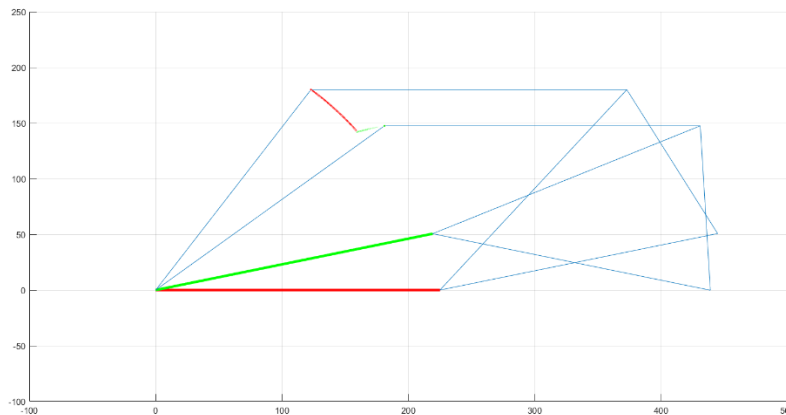


Figura 2.15. trayectoria seleccionada para compensación de plataforma de carga.

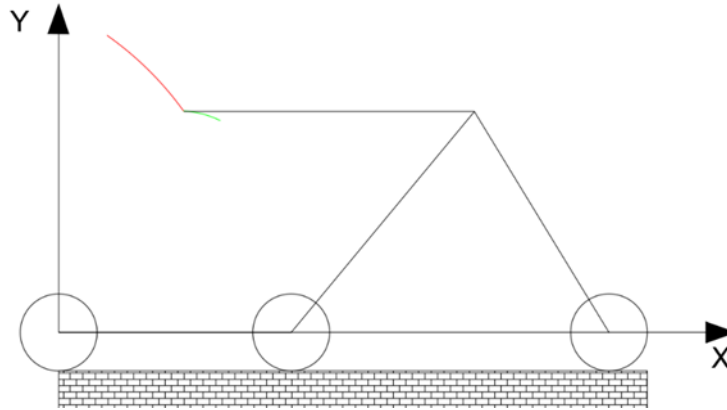


Figura 2.16. Esquema trayectorias seleccionadas.

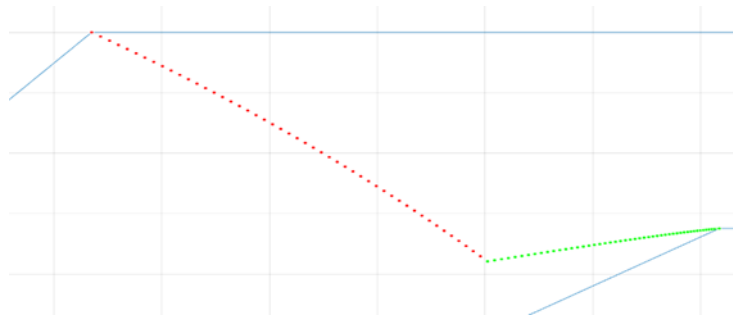


Figura 2.17. Trayectorias seleccionadas con un acercamiento.

2.4. Diseño de mecanismo para compensación de plataforma de carga

Una vez seleccionada la trayectoria a utilizar se procede a diseñar el dispositivo para la compensación de la plataforma [44]. Para ello se procede a realizar el modelo CAD de cada eslabón para su posterior fabricación.

La trayectoria seleccionada en la sección 2.3 es dibujada obteniendo de la simulación numérica las coordenadas de la trayectoria como se muestra en la Figura 2.18. La plataforma de carga tiene que recorrer la trayectoria para compensar su ángulo de inclinación. Para facilitar el deslizamiento entre la plataforma de carga y la pieza que tiene la forma de la trayectoria es necesario utilizar un rodamiento. La pieza con la forma de la trayectoria tiene que ser dividida en dos piezas, para facilitar la inserción del rodamiento en su interior como se muestra en la Figura 2.19 si la pieza no fuera fabricada en dos piezas, la fricción entre el material de impresión haría que este no deslizara correctamente, por lo que la mejor opción fue construirla en dos partes. Las dos partes tienen que ser unidas mediante tornillos para asegurar el correcto ensamble de la pieza como se muestra en la Figura 2.20. Dos tornillos de los 7 mostrados sirven para fijar el dispositivo deslizador a él eslabón conectado a las llantas central y trasera. Los tornillos utilizados son los suficientemente largos para alcanzar a pasar por las dos piezas del dispositivo de tal manera que se utilicen los mismos tornillos para la mayoría de la suspensión. La posición de los tornillos en el eslabón de compensación fue considerada de tal manera que evitará interferir con otros elementos de la suspensión.

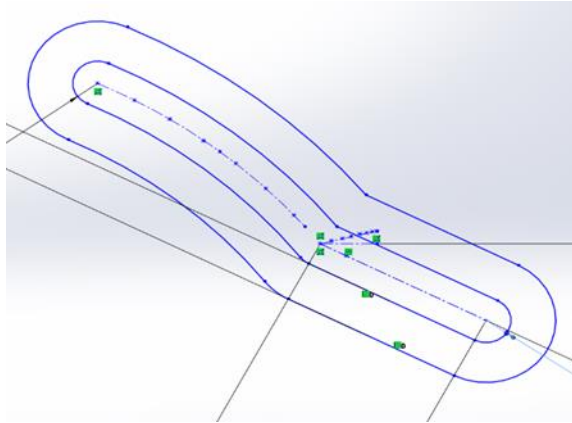


Figura 2.18. Bosquejo eslabón para compensación de plataforma de carga.

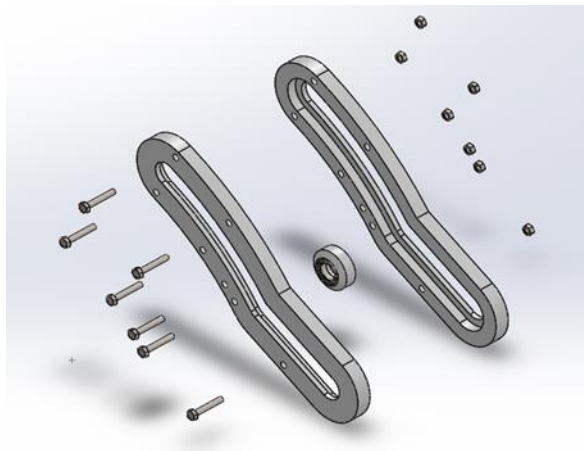


Figura 2.19. Vista de explosión eslabón para compensación de plataforma de carga.

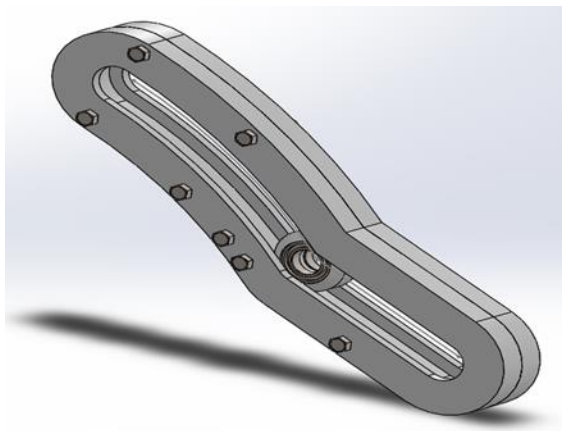


Figura 2.20. Modelo CAD del eslabón para compensación de plataforma de carga.

2.5. Simulación de mecanismo de plataforma de carga

Una vez sintetizado y modelado el dispositivo de compensación de la plataforma de carga se procede a verificar su funcionamiento por simulación. La simulación se realizó en el software *SolidWorks®* y se utilizó el terreno de pruebas mostrado en la Figura 2.21. El terreno de pruebas propuesto fue pensado con el objetivo de poner a prueba los casos utilizados para el diseño del mecanismo deslizador, así como los casos no considerados para conocer su comportamiento. Las dimensiones mostradas en la Figura 2.21 se indican en la Tabla 2.3. El ancho del terreno de pruebas es de 338 mm, longitud suficiente para que el robot atraviese los terrenos de manera simétrica.

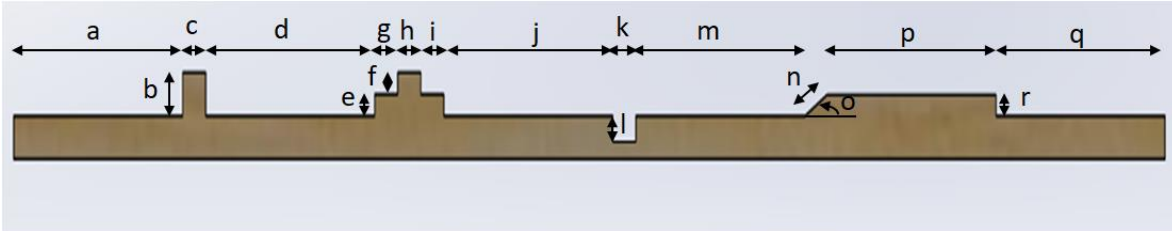


Figura 2.21. Terreno de pruebas propuesto.

Tabla 2.3. Dimensiones del terreno de pruebas propuesto.

Tramo	Dimensión (mm)
a, d, j, m, p, q	520
c, g, h, i, k	71
e, f	25.5
b	51
l	30
n	73.1
o	20°
r	25

La simulación se realiza considerando las mismas dimensiones utilizadas en 2.2 para que el mecanismo concuerde con las trayectorias obtenidas para el dispositivo deslizador. Se simula bajo condiciones perfectas donde no existe deslizamiento y la velocidad de las ruedas es constante. En la Figura 2.22 se muestra la gráfica obtenida en *SolidWorks®*. La gráfica muestra la inclinación de la plataforma de carga con respecto al tiempo en que está recorriendo la suspensión el terreno de pruebas. Como se puede observar cuando la llanta frontal y la llanta central sobrepasa el primer obstáculo en el terreno de pruebas (de 0 a 1.7 s) el ángulo de la plataforma de carga se mantiene casi en 0°. Este comportamiento es esperado ya que el dispositivo deslizador se diseñó para compensar dos casos (llanta frontal y llanta central sobre obstáculo). El ángulo de inclinación no es 0° cuando la llanta central sobrepasa el obstáculo a diferencia de lo indicado en la cinemática debido a que el dispositivo deslizador se desplaza cuando la llanta central sobrepasa un obstáculo. Se puede observar en la Figura 2.23 a) el paralelogramo cuando las tres llantas están sobre el

nivel del suelo y en la Figura 2.23 b) se observa como el dispositivo deslizador se inclina debido a su conexión directa con la llanta central, es por esto que cuando la llanta central sobrepasa el obstáculo tiene una inclinación diferente de 0°. La llanta trasera no fue considerada en el dispositivo deslizador y de acuerdo con la gráfica se observa que cuando la llanta trasera sobrepasa el primer obstáculo (3.5 s a 4 s) es cuando mayor inclinación se presenta en la plataforma de carga llegando a los 13°.

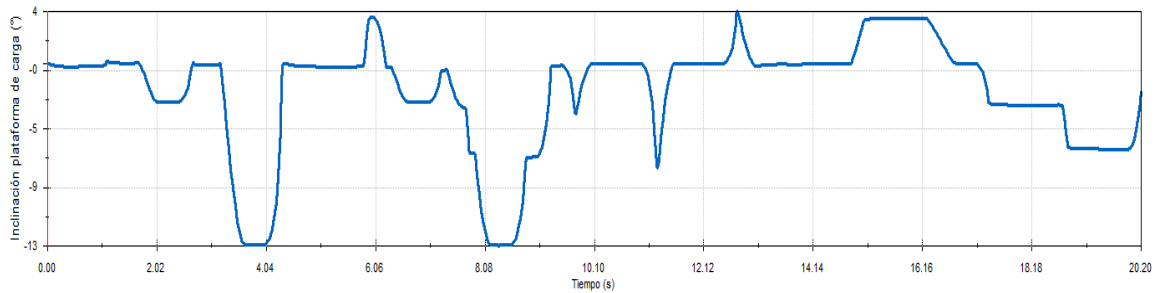


Figura 2.22. Gráfica desplazamiento angular de la suspensión CIEP_1 (2020) mientras atraviesa el terreno de pruebas.

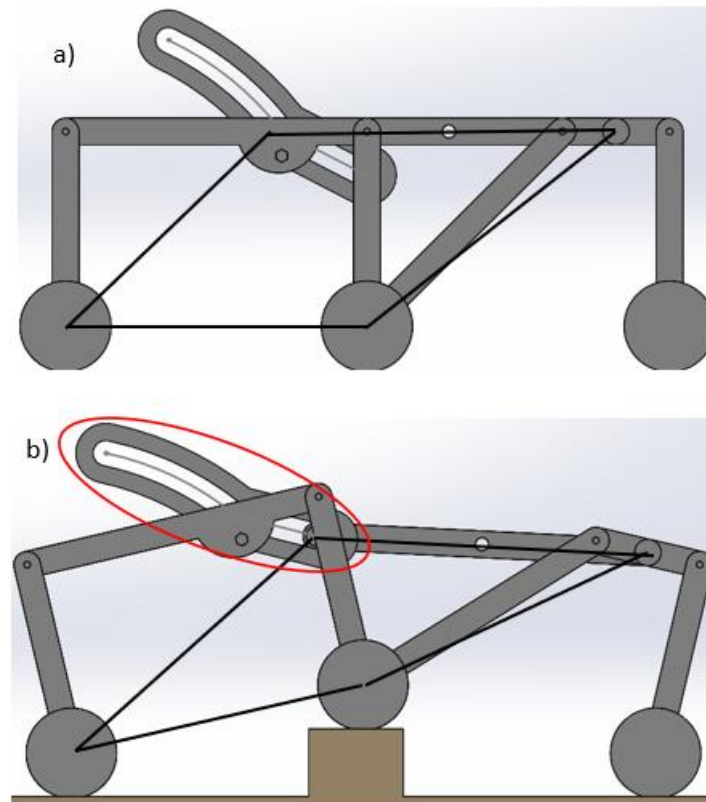


Figura 2.23. Movimiento del dispositivo deslizador. a) Tres llantas sobre el suelo, b) Llanta central sobre obstáculo.

Los resultados de la simulación demuestran que el dispositivo deslizador cumple la función para el cual fue sintetizado. La función del dispositivo es mantener la plataforma de carga lo más horizontal posible al subir obstáculos con su llanta frontal y central. El siguiente paso es la comparación con sistemas reportados en la literatura para conocer su desempeño.

En este capítulo se realizó el análisis cinemático de la suspensión con el propósito de proponer nuevas dimensiones a partir de las dimensiones en el prototipo desarrollado anteriormente. Se genera un nuevo dispositivo deslizador para la compensación de la horizontalidad de la plataforma de carga. Se estudian las trayectorias generadas proponiendo diferentes dimensiones a la suspensión. Las nuevas dimensiones propuestas consideran el espacio de trabajo para ser fabricadas mediante manufactura aditiva. Se presenta la selección de las trayectorias usando las nuevas dimensiones. Se muestra el diseño del dispositivo deslizador. Se simula la suspensión usando el dispositivo deslizador diseñado y se presenta el desempeño del dispositivo propuesto. El desempeño del dispositivo resulta satisfactorio de acuerdo con la cinemática desarrollada para la suspensión, por lo que el siguiente paso es comparar el desempeño de la suspensión con otros robots reportados en la literatura especializada.

3

3. Evaluación de la suspensión pasiva y comparativa con otros modelos existentes de suspensión

Un vehículo que basa su movilidad en ruedas puede quedar bloqueado de muchas formas: este bloqueo puede ser longitudinal o lateral, puede volcarse lateral o longitudinalmente o puede quedar atrapado debajo de una saliente. Solucionar cualquiera de los problemas anteriores puede empeorar los otros: para evitar volcaduras, el vehículo debe ser ancho y bajo, pero para evitar quedar varado sobre algún obstáculo, debe ser angosto y alto. Estas son solo algunas características que se consideraron para el diseño de la suspensión CIEP_1 (2020).

3.1. Análisis cinemático de suspensiones reportadas en literatura

Para la comparación entre suspensiones encontradas en la literatura y la propuesta en este tema de tesis se escogen tres suspensiones:

- *Rocker-Bogie* tradicional.
- *Parallel Bogie* (*Bogie* paralelo).
- *Three bogie* (tres *Bogies*).

Las suspensiones fueron escogidas debido al buen desempeño que se reporta en su capacidad para sobrepasar obstáculos además de que las tres fueron desarrolladas para la exploración planetaria lo que hace confiable la robustez de su diseño cinemático.

El primer análisis realizado es para la configuración tradicional *Rocker-Bogie*, la más popular y utilizada en las misiones espaciales. La suspensión con configuración *Rocker Bogie* utilizada en el robot *Sojourner*, que fue el primer robot que exploró el planeta Marte en 1997 [45], ver Figura 3.1, es una solución comprobada de movilidad, se destaca por una buena estabilidad del vehículo y su capacidad para trepar obstáculos. Este sistema fue desarrollado por el laboratorio de propulsión a chorro (*JPL* por sus siglas en inglés) para las misiones espaciales de la NASA. El sistema mencionado se basa en un par de eslabones llamados *Rocker* y *Bogie* mostrados en la Figura 3.2, donde se conecta un eslabón llamado *Bogie* (color rojo) por medio de una junta rotativa al eslabón *Rocker* (color azul) considerado como el eslabón “fijo” ya que no gira con respecto a ningún otro eslabón. El conjunto *Rocker Bogie* se une a cada lado de la masa suspendida por otra junta rotativa, con un elemento diferencial (punto negro) para estabilizar la plataforma de carga (línea punteada). Así como las ruedas pueden moverse libremente para arriba o abajo con juntas rotativas, el sistema es capaz de distribuir la carga equitativamente entre las seis ruedas. Es importante mencionar que, debido a las condiciones del camino y la geometría del sistema, en ocasiones no todas las ruedas pueden permanecer en contacto con el terreno y debido a esto pierde tracción.

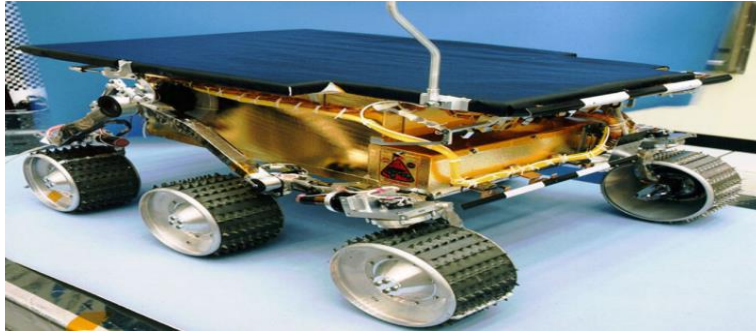


Figura 3.1. Robot Sojourner.

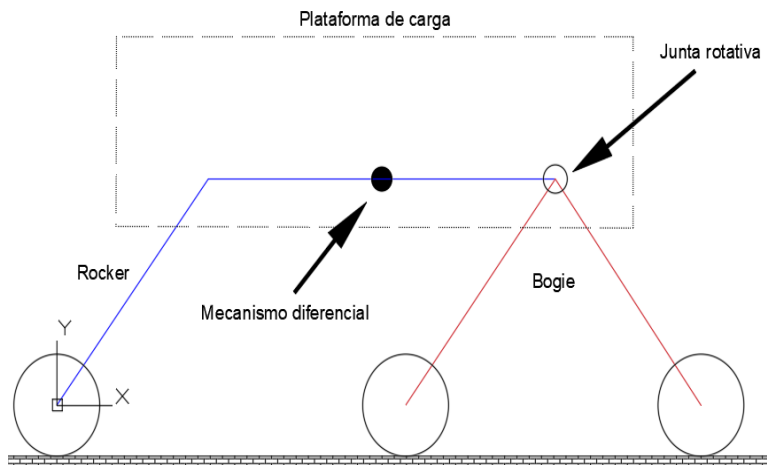


Figura 3.2. Esquematación Rocker-Bogie.

La siguiente configuración analizada es la llamada *Parallel Bogie* utilizada en el robot móvil llamado *RCL-E* [43]. Esta configuración resuelve el problema mencionado para la configuración *Rocker-Bogie* en el que el *Bogie* tiende a atascarse al atravesar cierto tipo de obstáculos (angostos y altos). La configuración resuelve el problema subiendo el pivote de giro del *Bogie*, utilizando una arquitectura paralela en el *Bogie* donde se eleva el pivote virtual sin sacrificar distancia libre del suelo. El pivote en la configuración *Rocker-Bogie* no puede ser elevado simplemente elevando físicamente el eslabón *Bogie* ya que entre más alto se encuentre el eslabón, este tiende a volcarse, reduciendo su capacidad de sobrepasar obstáculos. El sistema *Parallel-Bogie* mostrado en la Figura 3.3 se basa en la configuración *Rocker-Bogie* con la excepción de que el *Bogie* utiliza la arquitectura paralela utilizando un paralelogramo. Al utilizar esta arquitectura se eleva el pivote y se deja espacio libre entre el suelo y los eslabones aumentando de esta manera su capacidad de atravesar terrenos accidentados con obstáculos angostos y altos.

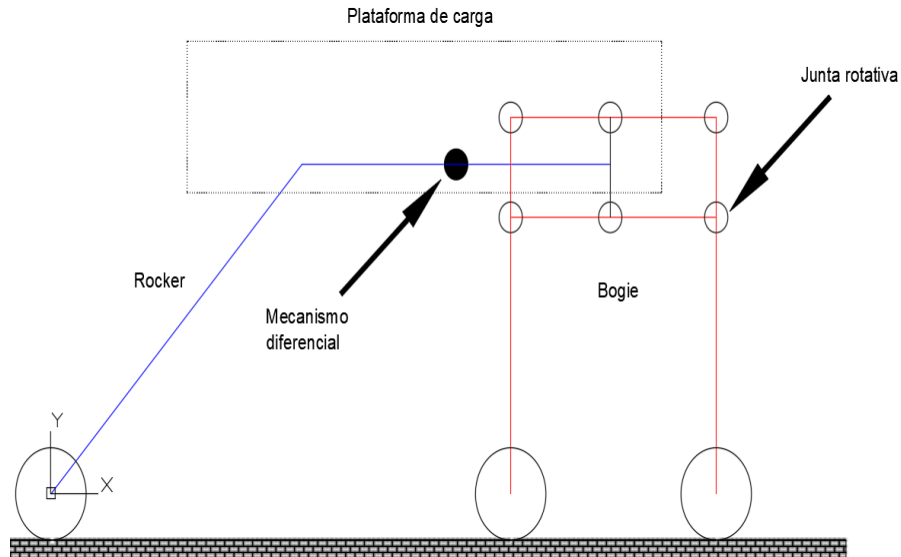


Figura 3.3. Esquematización bogie paralelo.

Como se puede apreciar en la Figura 3.3 el sistema mencionado contiene dos elementos importantes el *Rocker* y el *Bogie*, como lo hace la configuración *Rocker-Bogie* tradicional con la excepción de que el *Bogie* (color rojo) contiene más elementos y 6 juntas rotativas para que el paralelogramo gire con respecto al eslabón *Rocker* (color azul). Éste al igual que la configuración mostrada anteriormente utiliza un mecanismo diferencial (punto negro) para conectar ambos flancos con la plataforma de carga. Analizando la configuración del *Bogie* paralelo, se sabe que contiene más elementos (4 elementos o eslabones) que un *Bogie* tradicional (1 o 2 elementos o eslabones); sin embargo, cuenta con un único grado de libertad. Considerando la ventaja del aumento de la capacidad de subir obstáculos resulta preferible utilizar esta configuración.

Por último, la siguiente configuración analizada es la llamada *Three Bogie* la cual se muestra en la Figura 3.4 [42]. Esta configuración a diferencia de las anteriores utiliza menos eslabones, no utiliza el elemento *Rocker* y es más sencilla cinemáticamente hablando, contando con solo una junta rotativa por eslabón. Además de esto se elimina el mecanismo diferencial de la plataforma de carga, ya que la configuración *Three Bogie* es más estable al tener tres puntos de apoyo en la plataforma de carga. Este sistema, como su nombre lo indica, utiliza tres *Bogies*, dos de estos *Bogies* están situados al frente lateralmente y están conectados a la plataforma de carga por una junta rotativa. El tercer *Bogie* está situado transversalmente a los otros dos y se conecta mediante una junta rotativa. Estos son los tres puntos de apoyo de la plataforma de carga, eliminando así el uso del mecanismo diferencial para la estabilidad de la plataforma. La sencillez y la estabilidad estática de esta configuración hace muy atractivo su uso; sin embargo, su capacidad para sobrepasar obstáculos también depende de los obstáculos que llegue a encontrar y su distancia libre al suelo.

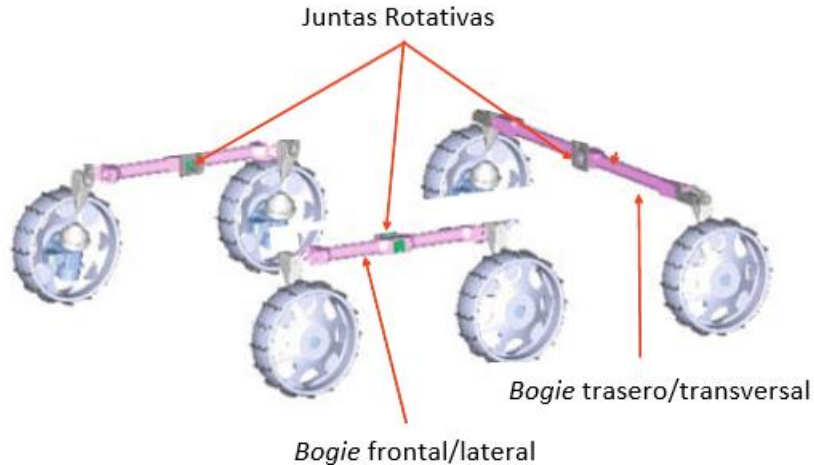


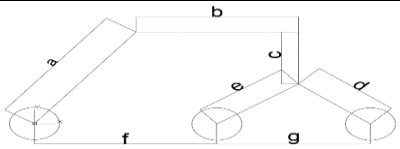
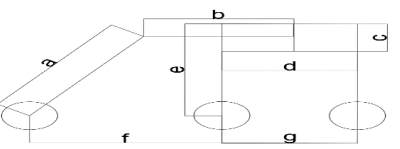
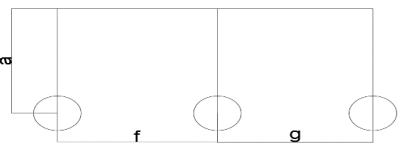
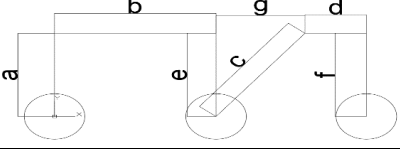
Figura 3.4. Configuración 3 Bogie [42].

Existen muchas suspensiones basadas en ruedas, sin embargo, la gran mayoría de estas suspensiones son solo el resultado de la evolución de la suspensión *Rocker-Bogie* desde utilizar dos *Bogies* en cada extremo del *Rocker*, hasta conectar dos *Bogies* con una llanta en común y muchas otras como se vio en el capítulo 1. Dejando de lado las suspensiones activas, las suspensiones seleccionadas para el análisis comparativo, son suspensiones que no fueron directamente consideradas en el diseño de la suspensión CIEP_1 (2011). Una vez analizadas las suspensiones se procede a modelarlas y simularlas para conocer el comportamiento de su plataforma de carga al recorrer un terreno con diferentes obstáculos.

Para el modelado de las suspensiones es necesario saber las dimensiones que se utilizarán para la comparación. La comparación entre las 3 suspensiones debe ser equitativa por lo que se requieren dimensiones iguales en la distancia entre ejes y diámetro de las llantas. Estas características (distancia entre ejes y diámetro de las llantas) son las responsables de afectar el desempeño de la suspensión. Si el diámetro de la llanta aumenta su capacidad de subir obstáculos incrementa, a su vez, si la llanta es de menor tamaño su capacidad de subir obstáculos también decrece. Para la distancia entre ejes, si la distancia es de menor tamaño al ancho de los obstáculos puede aumentar la inclinación presentada en la plataforma de carga y viceversa.

En la Tabla 3.1 se muestran las dimensiones utilizadas para cada suspensión. Como se puede observar la distancia entre ejes y el diámetro de las ruedas es el mismo para las tres suspensiones, las cuales se propusieron en la sección 2.1.

Tabla 3.1 Dimensiones utilizadas para las simulaciones de las suspensiones.

Suspensión	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)	Diametro rueda (mm)
	110	337	50	127	127	225	225	68
	171	207	45	225	132	225	225	68
	110	NA	NA	NA	NA	225	225	68
	145	225	206	80	145	145	146	68

3.2. Simulación cinemática de suspensiones

Las simulaciones de las suspensiones seleccionadas se realizaron en el software *Solidworks®* utilizando el complemento *Solidworks Motion*. Las simulaciones fueron hechas bajo las mismas condiciones que la suspensión CIEP_1 (2020), es decir, misma distancia entre ejes, mismo diámetro de llantas, misma velocidad de avance y mismo terreno de pruebas (terreno de pruebas simétrico presentado en la sección 2.5).

Los resultados de las simulaciones se presentan como una gráfica en donde se muestra el comportamiento (ángulo de inclinación) de la plataforma de carga mientras atraviesa el terreno, de cada una de las suspensiones consideradas. Las gráficas obtenidas muestran el cambio de ángulo (eje de ordenadas) con respecto al tiempo (eje de abscisas) donde se encuentran ubicadas las suspensiones en el terreno de pruebas.

Los resultados obtenidos para la configuración *Rocker-Bogie* se muestran en la Figura 3.5 donde el eje de abscisas indica el tiempo que le toma a la suspensión en recorrer el terreno de pruebas y el eje de ordenadas indica el valor en grados del ángulo de inclinación de la plataforma de carga. La flecha de color rojo indica el ángulo máximo presentado en la configuración *Rocker-Bogie* tradicional. El ángulo máximo tiene un valor de -8.59° y se presenta cuando la llanta trasera sube el obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas.

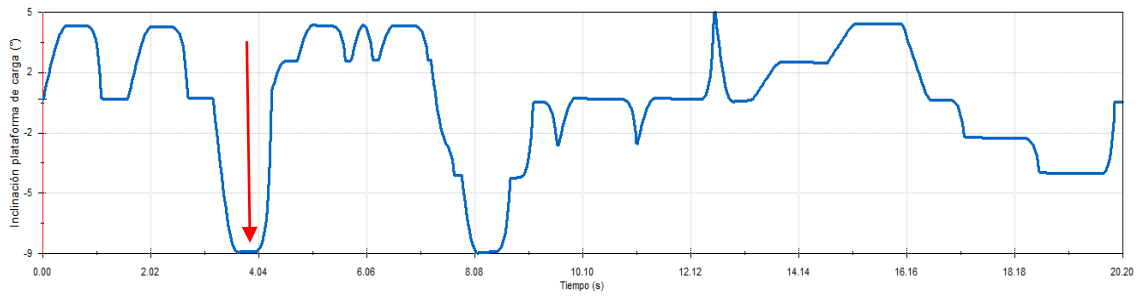


Figura 3.5. Gráfica ángulo contra tiempo (Rocker Bogie).

Los resultados obtenidos para la configuración *Parallel Bogie* se muestran en la *Figura 3.6*, en donde la flecha en color rojo indica el ángulo máximo, el cual tiene un valor de -8.75° y se presenta cuando la llanta trasera sube el obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas.

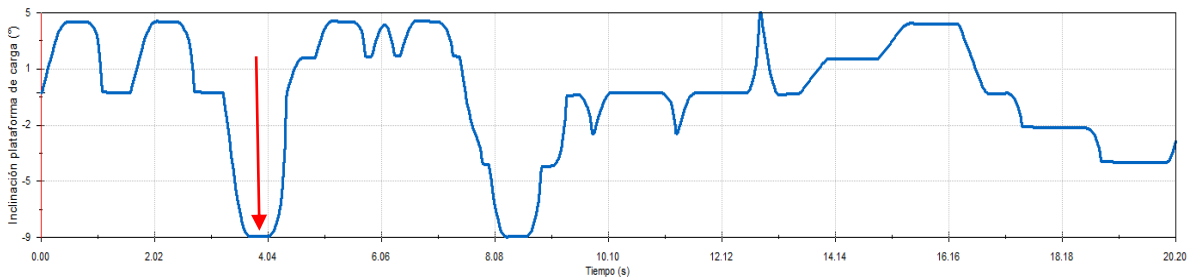


Figura 3.6. Gráfica ángulo contra tiempo (Parallel Bogie).

Los resultados obtenidos para la configuración *Three Bogie* se muestran en la *Figura 3.7*, la flecha en color rojo indica el ángulo máximo que tiene un valor de -7.42° y se presenta cuando la llanta trasera sube el obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas.

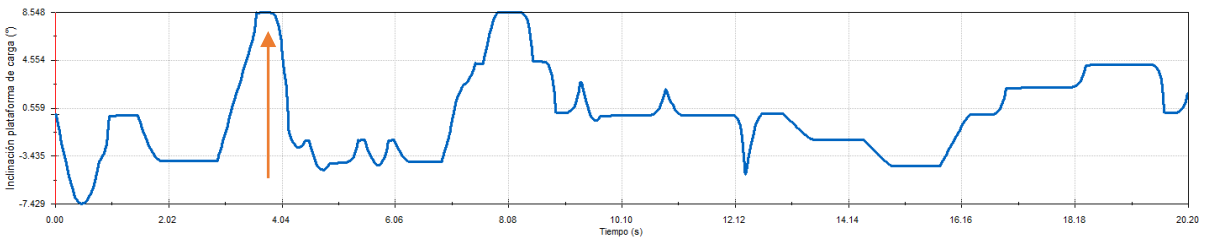


Figura 3.7. Gráfica ángulo contra tiempo (Three Bogie).

Las tres simulaciones alcanzan su ángulo máximo cuando la llanta trasera de cada una de las suspensiones está sobre el obstáculo de mayor tamaño. La llanta trasera en las tres configuraciones está ensamblada con el eslabón que lleva la plataforma de carga, es por esto por lo que la magnitud del ángulo alcanza su máximo valor en estos casos.

3.3. Comparativa entre suspensiones reportadas contra suspensión CIEP_1 2020

Una vez simuladas las configuraciones se procede a comparar su desempeño entre sí y contra la suspensión CIEP_1 (2020), que es la suspensión desarrollada en este trabajo de tesis. Para hacer la comparación se procede a analizar los datos obtenidos en las simulaciones, mediante la gráfica mostrada en la Figura 3.8, la cual integra todos los resultados de la sección 3.2. En la gráfica de la Figura 3.8 se observa que las cuatro configuraciones se comportan de manera similar, sin embargo, la suspensión CIEP_1 (2020) muestra ángulos cercanos a cero cuando las demás configuraciones muestran valores mayores a cero. A pesar de esta observación, no es posible saber cuál de las cuatro suspensiones tiene un mejor desempeño al atravesar el terreno de pruebas propuesto.

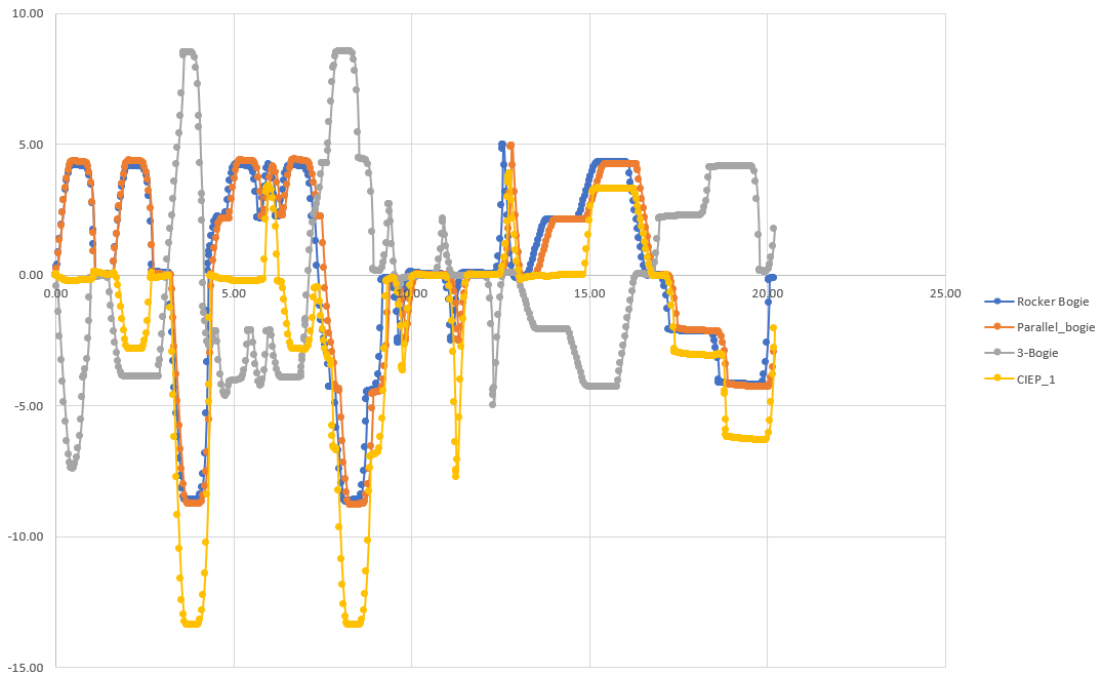


Figura 3.8. Gráfica de las cuatro configuraciones simuladas.

La Tabla 3.2 muestra los ángulos máximos presentados en la plataforma para cada una de las configuraciones simuladas a lo largo del terreno de pruebas. La inclinación máxima se debe a la llanta trasera sobrepasando el obstáculo de mayor tamaño. La llanta trasera presenta la mayor inclinación debido a que está ensamblada directamente con el eslabón que lleva la plataforma de carga. La suspensión CIEP_1 (2020), compensa la inclinación de la plataforma de carga cuando la llanta frontal y central sube un obstáculo, sin embargo, no compensa a la llanta trasera como se explicó en la sección 2.3.

La Tabla 3.2 no aporta un valor numérico que indique el mejor desempeño de las suspensiones, ya que, aunque los ángulos máximos son importantes, hay puntos en el terreno de prueba donde la suspensión CIEP_1 (2020) obtiene valores menores a los de las configuraciones analizadas. La norma y norma ponderada es un coeficiente presentado por primera vez en: [11] que se utilizará para conocer el desempeño de las configuraciones. Se seleccionaron las secciones del terreno de pruebas, mostrados en la Figura 3.9. En la

sección 1 del terreno de pruebas (Figura 3.9) se consideran tres ángulos de la plataforma de carga, cuando la llanta frontal, central y trasera están sobre el obstáculo (Figura 3.10 a) b) c)).

Sección 2 se consideran dos ángulos. El primer ángulo de esta sección se presenta cuando la llanta frontal se encuentra en el escalón de la derecha y la llanta central se encuentra en el escalón de la izquierda (Figura 3.10 d)). El segundo ángulo de la sección 2 se presenta cuando la llanta central se encuentra en el escalón de la derecha y la llanta trasera se encuentra en el escalón de la izquierda (Figura 3.10 e)).

Sección 3, se consideran tres ángulos de esta sección para conocer el comportamiento de la suspensión al caer en un bache. Los tres ángulos para considerar son cuando cada una de las llantas están dentro del bache (Figura 3.10 f) g) h)).

En la Sección 4 se considera un ángulo, cuando las llantas frontal y central ya subieron la pendiente y la llanta trasera se encuentra al nivel del suelo (Figura 3.10 i)).

Sección 5 se consideran los dos últimos ángulos. El primer ángulo se considera cuando la llanta frontal se encuentra al nivel del suelo y las demás aún se encuentran en la sección 4 (Figura 3.10 j)). El último ángulo del estudio se considera cuando la llanta trasera está en la sección 4 y la llanta frontal y central se encuentran al nivel del suelo (Figura 3.10 k)).

Tabla 3.2. Ángulos máximos de inclinación de la plataforma para las cuatro configuraciones.

Configuración	Ángulo máximo (°)
Rocker Bogie	8.59
Parallel Bogie	8.75
3 Bogie	8.48
CIEP_1 2020	13.36

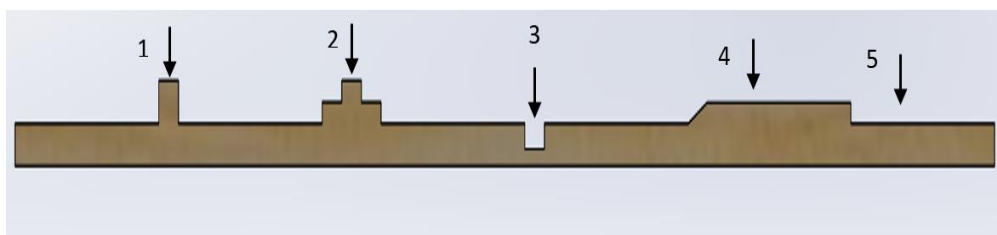


Figura 3.9. Secciones utilizadas para la obtención de la norma.

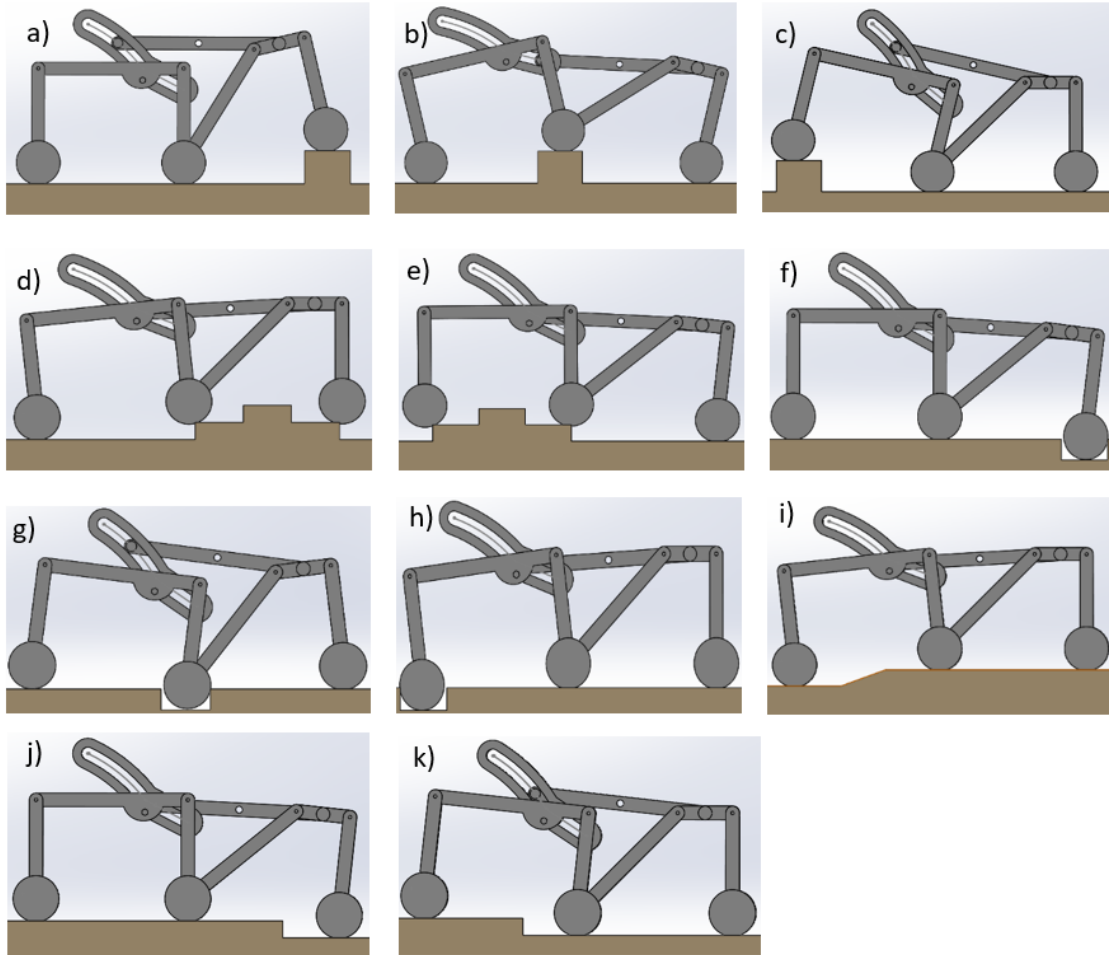


Figura 3.10. Posiciones tomadas para la medición de ángulos en la norma y norma ponderada a) Llanta frontal sobre obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. b) Llanta central sobre obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. c) Llanta trasera sobre obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. d) Llanta frontal y central sobre escalón de 25.5 mm de alto. e) Llanta central y trasera sobre escalón de 25.5 mm de alto. f) Llanta frontal dentro de bache. g) Llanta central dentro de bache. h) Llanta trasera dentro de bache. i) Llantas frontal y central sobre obstáculos de 25 mm de alto y llanta trasera a nivel del suelo. j) Llantas central y trasera sobre obstáculos de 25 mm de alto y llanta frontal a nivel del suelo. k) Llantas frontal y central a nivel del suelo y llanta trasera sobre obstáculo de 25 mm de alto.

Obtenidos los ángulos en las 5 secciones del terreno de pruebas para las tres configuraciones se procede a sacar la norma (N), la norma ponderada (WN) y la desviación estándar, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |Y_i|}{n} \quad (3.1)$$

donde Y_i es el ángulo medido en la respectiva sección, n es el número de valores tomados para la evaluación (la suma del total de los ángulos medidos en cada sección). Para el cálculo de la norma se suman los valores absolutos de los ángulos de inclinación explicados en la Figura 3.10 se dividirán entre el número de datos.

$$WN_j = \frac{N_j - K\Delta N}{N_{MAX} - K\Delta N} \quad (3.2)$$

donde WN es la norma ponderada, N_j es la norma del sistema (suspensión que se evalúa) y K es un factor de escala constante, y ΔN es:

$$\Delta N = N_{MAX} - N_{MIN} \quad (3.3)$$

De la ecuación 3.3 se hace la resta del valor de la norma máxima menos el valor de la norma mínima de los sistemas que se estén evaluando en el análisis ($N_{MAX} = 4.18^\circ$, $N_{MIN} = 3.79^\circ$ y $\Delta N = 0.38^\circ$).

El valor de la norma ponderada para cada suspensión WN_j se calcula utilizando el valor máximo y mínimo de la norma ponderada de las cuatro suspensiones comparadas (*Rocker-Bogie*, *Parallel-Bogie*, *Three-Bogie* y CIEP_1 (2020)) y se utiliza un factor de escala constante $K = 1$.

La desviación estándar se obtiene de la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x-\mu)^2}{n}} \quad (3.4)$$

Donde μ es la media del conjunto de datos, $(x - \mu)^2$ es la distancia de cada uno de los datos a la media, donde se eleva esa distancia al cuadrado y n es el número de datos. La desviación estándar nos indicara que tan disperso están los datos con respecto a la media. Entre menor sea la desviación los datos estarán más agrupados cerca de la media.

Los ángulos medidos en cada sección del terreno de pruebas se muestran en la Tabla 3.3 como se dijo anteriormente se consideran 11 ángulos a lo largo del terreno de pruebas para el análisis del comportamiento de cada configuración. Los 11 ángulos consideran todos los obstáculos del terreno de pruebas propuesto, con el fin de que el análisis sea equitativo para las cuatro suspensiones. Los resultados de la norma, norma ponderada, ángulo máximo presentado en cada configuración a lo largo del terreno de pruebas y desviación estándar se muestran en la Tabla 3.4. Recordando que entre más bajo sea el número obtenido en la norma y la norma ponderada mejor el desempeño de la suspensión. La suspensión *Rocker-Bogie* muestra un valor de norma ponderada y desviación estándar menor a la de las demás suspensiones, sin embargo, el ángulo máximo de menor magnitud de las cuatro suspensiones comparadas lo obtiene la suspensión *Three Bogie*. Por lo que se considera que el mejor desempeño lo obtiene la suspensión *Rocker-Bogie*. La suspensión CIEP_1 (2020) tiene la característica de utilizar un dispositivo deslizador para compensar la horizontalidad de la plataforma. El terreno de pruebas propuesto contiene diferentes obstáculos a los cuales se podría enfrentar la suspensión. Las bondades de la suspensión CIEP_1 (2020) pueden tener ventajas para un terreno semiestructurado.

Tabla 3.3. Ángulos medidos en cada sección para el cálculo de la norma y norma ponderada de cada configuración.

Punto "n"	Rocker-Bogie (°)	Parallel Bogie (°)	3-Bogie (°)	CIEP_1 (°)
1	4.16	4.31	3.89	0.23
2	4.13	4.34	3.91	2.85
3	8.49	8.75	8.48	13.37
4	4.21	4.13	4.24	2.94
5	2.45	2.62	2.29	3.08
6	2.49	2.52	2.67	3.66
7	2.53	2.51	2.13	5.48
8	2.64	4.92	5.00	3.60
9	4.28	4.22	4.28	3.27
10	2.17	2.14	2.21	3.02
11	4.18	4.24	4.12	4.46

Tabla 3.4. Índices de comparación entre sistemas.

	Rocker Bogie	Parallel Bogie	3 Bogie	CIEP_1
Norma (N)	3.79	4.06	3.93	4.18
Norma ponderada (WN)	0.90	0.97	0.93	1.00
Ángulo Máximo (°)	8.49	8.75	8.48	13.36
Desviación Estándar	1.70	1.74	1.72	3.15

El terreno de pruebas se propuso con la intención de analizar el comportamiento de la plataforma de carga bajo diferentes tipos de obstáculos que no fueron considerados en la selección de la trayectoria para el dispositivo deslizador. Se recuerda también que el terreno de pruebas propuesto es simétrico es decir cada par de llantas suben los obstáculos al mismo tiempo. La suspensión CIEP_1 (2020) tiene como característica compensar el ángulo de inclinación de la plataforma de carga cuando sus llantas frontales y centrales sobrepasan un obstáculo sin considerar la compensación de la llanta trasera. Dichas características dan como resultado el desempeño mostrado en la Tabla 3.4 estas características pueden ser de utilidad en aplicaciones donde el ángulo de inclinación máximo de 13 grados sea despreciable o el terreno de la aplicación es semiestructurado con obstáculos menores a los presentados en el terreno de pruebas propuesto.

En este capítulo se presentó el análisis cinemático de tres suspensiones encontradas en la literatura. Las suspensiones cuentan con la característica de ser pasivas al igual que la suspensión CIEP_1 (2020) y han sido seleccionadas por programas de exploración planetaria en la literatura especializada. Se realizaron las simulaciones bajo las mismas condiciones y utilizando el mismo terreno de pruebas. Se reportaron resultados obtenidos de las simulaciones y se utilizaron cuatro factores (norma, norma ponderada, desviación estándar y ángulo máximo) para evaluar y comparar el desempeño de las cuatro suspensiones. En el siguiente capítulo se presenta el diseño y fabricación del prototipo de la suspensión CIEP_1 (2020) fabricado mediante manufactura aditiva.

4

4. Diseño y fabricación mediante manufactura aditiva de la suspensión

4.1 Análisis estructural

En la sección 2.1 se determinaron las longitudes que debe tener la suspensión CIEP_1 (2020) para cumplir con la cinemática modelada. Sin embargo, para que la suspensión sea funcional, su plataforma de carga debe soportar los instrumentos o equipo necesario para el correcto funcionamiento de esta, es decir baterías para los motores, tarjetas de adquisición de datos, cámaras y/o un brazo manipulador. La suspensión CIEP_1 (2020) es pensada para el desarrollo de proyectos de investigación por lo que se proponen 10 kg sobre la plataforma de carga para soportar el equipo necesario de la suspensión. El peso de 10 kg es un peso propuesto que considera aplicaciones de investigación del prototipo. Para otro tipo de aplicaciones se deberá considerar el uso de otro material para la construcción de la suspensión.

El análisis inicia determinando el número de eslabones que soportan que la carga de la plataforma. La vista superior mostrada en la Figura 4.1 indica que la carga se repartirá en tres elementos de la suspensión. Estos elementos se pueden analizar como vigas apoyadas en dos puntos, por lo que se denomina a cada elemento (eslabones) “Viga #1, #2 y #3” como se muestra en la Figura 4.1. En la Figura 4.2 se muestra una vista frontal de las vigas que soportaran la carga de la plataforma.

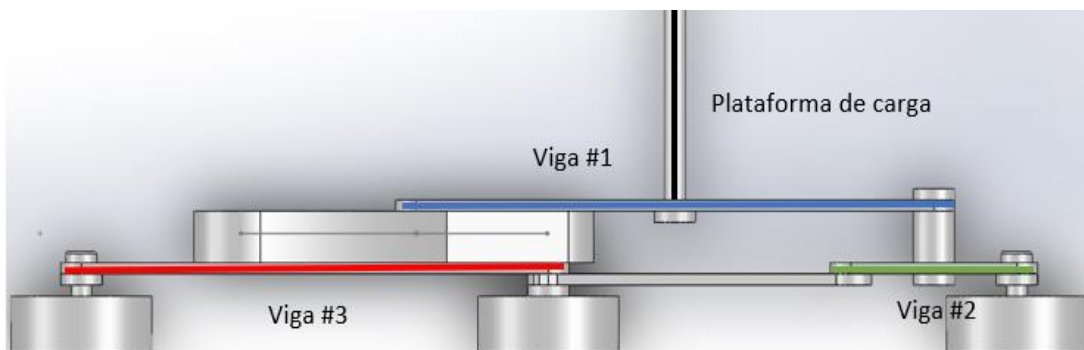


Figura 4.1 Vista superior suspensión CIEP_1 2020.

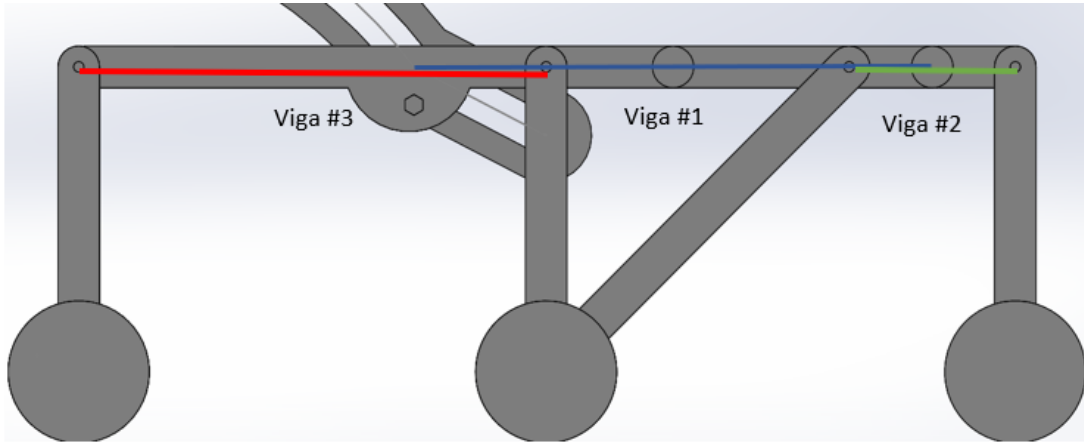


Figura 4.2. Vista lateral suspensión CIEP_1 2020.

El análisis de las vigas inicia conociendo cuanta carga recibirá cada viga respectivamente partiendo de los 10 kg apoyados a la plataforma de carga (línea color negro Figura 4.1). Los 10 kilos están soportados por la viga #1 por lo que se realiza el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 4.3. Las reacciones en los apoyos de la viga #1 serán la carga aplicada a la viga #2 y a la viga #3. Se realiza una suma de fuerzas en la dirección “y” (ecuación 4.1), sin embargo, se requiere una segunda ecuación para resolver las dos reacciones en los apoyos, por lo que se realiza una suma de momentos en el apoyo de la reacción #1 (ecuación 4.2).

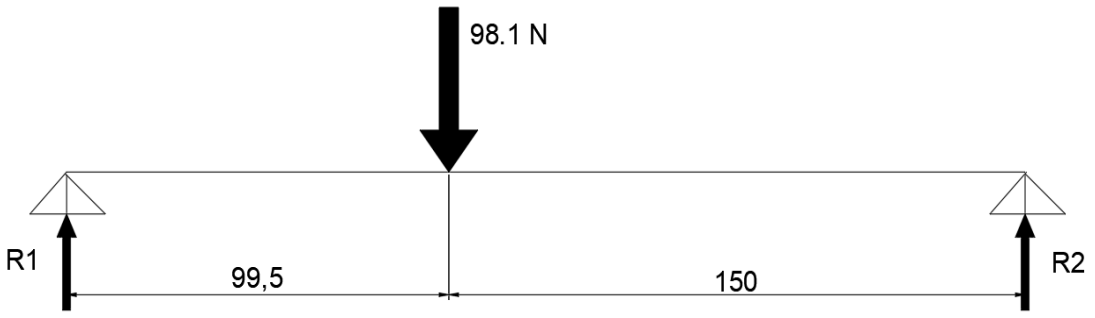


Figura 4.3. Diagrama viga #1.

$$\sum F_y = R_1 + R_2 = 98.1 \text{ N} \quad (4.1)$$

$$\sum M_{R_1} = (98.1 \text{ N})(0.0995 \text{ m}) - R_2(0.2495) \quad (4.2)$$

Resolviendo las ecuaciones 4.1 y 4.2 obtenemos que las reacciones son las siguientes:

- $R_1 = 59.98 \text{ N}$
- $R_2 = 39.12 \text{ N}$

Como se puede observar en la Figura 4.2 los apoyos de la viga #1 se encuentran ubicados sobre la viga #2 y la viga #3.

Se muestra en la Figura 4.4 el diagrama para la viga #3 donde la reacción R_1 de la viga #1 es la carga que soportará la viga #3. Además, se muestra en la Figura 4.5 el diagrama para la viga #2 donde la reacción R_2 es la carga que soportará la viga #2.

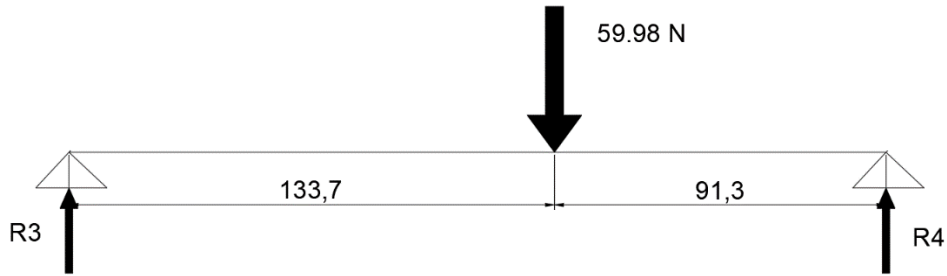


Figura 4.4. Diagrama viga #3.

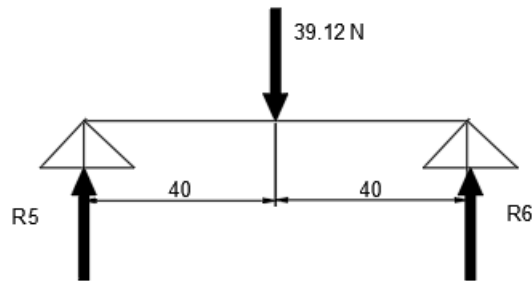


Figura 4.5. Diagrama viga #2.

Se resuelven las vigas utilizando la misma metodología que la utilizada en la viga #1 (suma de fuerzas en "y" y suma de momentos en alguno de los apoyos) para resolver las dos incógnitas, en cada una de las vigas. Se calcula el momento máximo presentado en cada una de las vigas, generando un diagrama de momento flector mostrado en la Figura 4.6. Las reacciones y el momento flector máximo para cada viga se muestran en la Tabla 4.1.

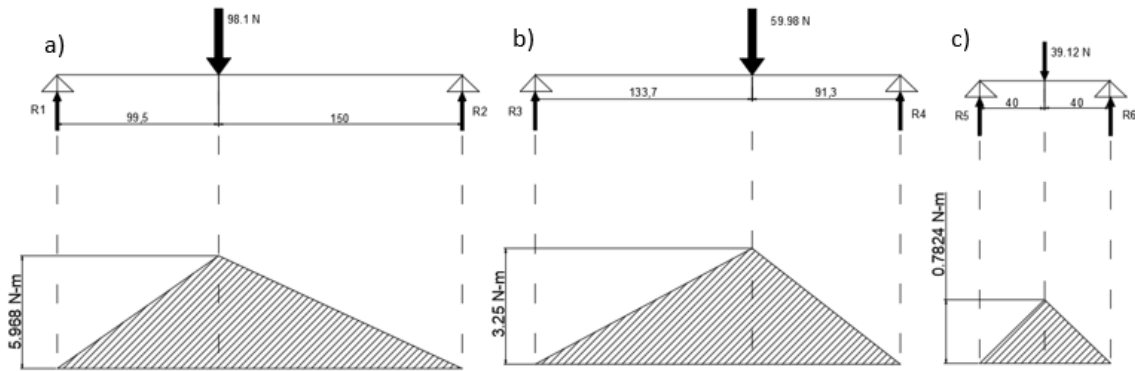


Figura 4.6. Diagrama de momento flector para cada una de las vigas. a) Viga#1. b) Viga #3. c) Viga #2.

Tabla 4.1. Cargas aplicadas a cada una de las vigas, reacciones en sus apoyos y momento flector máximo en cada viga.

# de viga	Carga sobre la viga (N)	Apoyos (N)		Momento flector máximo (N-m)
#1	98.1	R1=59.98	R2=39.12	5.968
#2	39.12	R5= 19.56	R6= 19.56	39.12
#3	59.98	R3=24.34	R4=35.6	3.25

Una vez encontrado el momento máximo al que serán sometidos las vigas se requiere conocer si los elementos soportan la carga propuesta a la que serán sometidos. Para calcular el esfuerzo de flexión en las vigas, se utilizan las siguientes ecuaciones de la mecánica de materiales [46].

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (4.3)$$

Donde σ_{max} es el esfuerzo normal máximo, M representa el momento flector máximo presentado en la viga, c es la distancia desde el eje neutro a la superficie de la viga donde se presenta el momento flector máximo e I es el segundo momento de área alrededor del eje z . Para un rectángulo como los utilizados en los eslabones de la suspensión CIEP_1 (2020) la fórmula para calcular el segundo momento de área es:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (4.4)$$

Donde las dimensiones b y h representan la base y la altura del rectángulo respectivamente. Las dimensiones de los eslabones (espesor y altura) utilizados en la suspensión CIEP_1 2020 se proponen a partir de los montajes que se realizarán con otros componentes, es decir, con rodamientos, tornillos y otros eslabones de tal manera que se pueda realizar un montaje adecuado entre componentes. Las dimensiones de b y h se muestran en la Tabla 4.2, así como su segundo momento de área y su esfuerzo máximo.

Tabla 4.2 dimensiones propuestas y esfuerzo máximo para vigas de suspensión CIEP_1 2020 .

# de viga	b (m)	h (m)	I (m^4)	c (m)	σ_{max} (MPa)
#1	0.012	0.035	4.287×10^{-8}	0.0175	2.43
#2	0.012	0.025	2.031×10^{-8}	0.0125	0.481
#3	0.012	0.025	1.562×10^{-8}	0.0125	2.6

Las secciones de las vigas calculadas en esta sección no son uniformes, es decir en sus extremos requieren un cambio de sección para ser conectadas con otros componentes. Este cambio de sección que es un agujero en la viga no afecta el análisis ya que como se puede ver en la Figura 4.6 el momento flector máximo se encuentra cerca de la mitad de la viga por lo que el esfuerzo máximo no se encontrara en el agujero y no afecta el análisis hecho.

Una vez que se conoce el esfuerzo máximo de cada viga, se procede a compararlo con el esfuerzo último de tensión del material con el que se construirán los eslabones de la suspensión. Si el esfuerzo máximo aplicado a la viga es inferior al esfuerzo último de tensión del material la viga soporta la carga a la que le será sometida.

El material más común utilizado para la impresión 3D es el ácido poliláctico mejor conocido como PLA. Las propiedades del filamento son bien conocidas y proporcionadas por los fabricantes del material, sin embargo, al imprimir una pieza las propiedades mecánicas de la pieza usando el filamento se modifican. Las propiedades mecánicas de una pieza fabricada con filamento PLA varían debido a diferentes factores como el porcentaje de relleno de las piezas, el ángulo de impresión, la adherencia entre capas, etc. En la literatura se reportan propiedades mecánicas de piezas utilizando manufactura aditiva mediante el proceso de modelado por deposición fundida *FDM* por sus siglas en inglés (principio de funcionamiento de impresora Anet A8). Uno de los trabajos que ha analizado el comportamiento estructural de componentes hechos mediante *FDM* y utilizando PLA, es el reportado en [47], en el cual se realizaron pruebas experimentales con probetas normalizadas fabricadas mediante *FDM*, utilizando distintos valores de porcentaje de relleno. Como resultado se observó que entre mayor es el porcentaje de relleno mayor es el esfuerzo equivalente y el módulo elástico de las probetas. En otro trabajo de la literatura [48] se reporta el ensayo de tensión sobre probetas fabricadas con material PLA y utilizando el método de modelado por deposición fundida con ángulos de impresión de 0° , 45° , $\pm 45^\circ$, $0/90^\circ$ y 90° . Se reportan los valores de esfuerzo a la tensión y módulo de Young de las probetas. Las probetas con el mejor rendimiento son las probetas con ángulo de impresión de 0° con valores de 68.1 MPa para el esfuerzo a la tensión y 5.3 GPa para el módulo de Young. Las probetas con el peor desempeño son las probetas impresas a 90° con valores de 55 MPa para el esfuerzo a la tensión y 4.8 GPa para el módulo de Young. Se muestra en la Figura 4.7 la curva esfuerzo deformación reportado en [48], se puede observar que se el esfuerzo es lineal a la deformación, tal y como se comporta un material frágil.

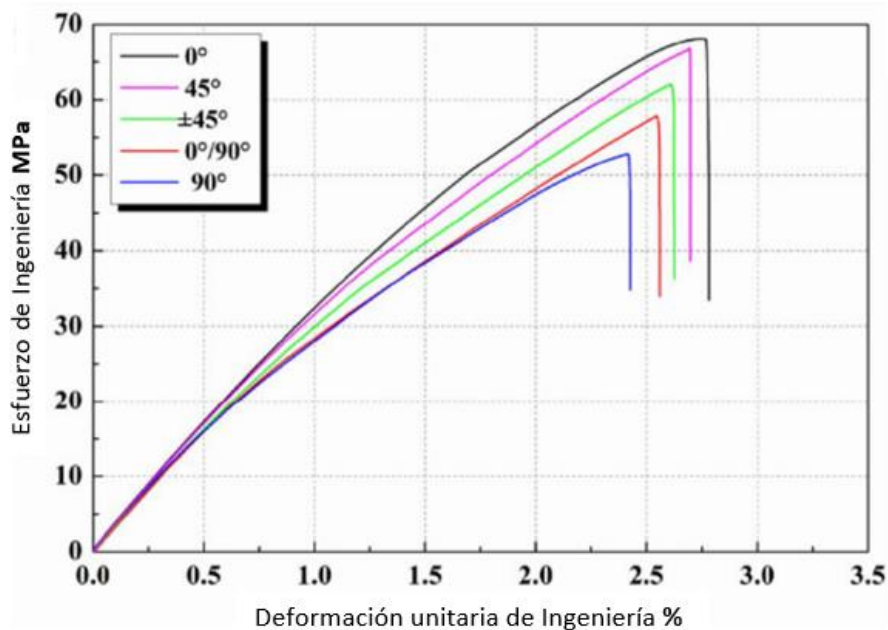


Figura 4.7. Curva esfuerzo-deformación probetas fabricadas a partir de PLA.

Los esfuerzos mostrados en la última columna de la Tabla 4.2 para las vigas de la suspensión son menores a los valores de resistencia a la tensión *PLA-FDM* reportados en la literatura, por lo que se decide utilizar las dimensiones propuestas para el cálculo. El siguiente paso es el diseño de la suspensión con los componentes necesarios para su correcto funcionamiento y utilizando las dimensiones calculadas.

4.2. Modelado CAD de piezas requeridas

Para el modelado de las piezas requeridas es necesario recordar que para que la suspensión funcione correctamente es necesario respetar las dimensiones que fueron sintetizadas y/o propuestas en las secciones anteriores.

Las dimensiones propuestas a partir de la síntesis del mecanismo de suspensión son las siguientes:

- Distancia entre ejes: 225 mm
- Diámetro de ruedas: 68 mm
- Altura de prototipo: 284 mm
- Longitud de prototipo: 451 mm

El ancho y alto de los eslabones fue calculado en la sección anterior (4.1). El primer elemento diseñado es el eslabón que llevará una llanta sin motor, el mismo eslabón conectará las vigas calculadas anteriormente.

4.2.1. Subensamble llanta frontal o trasera

Se creó un eslabón recto (eslabón 1) con la longitud requerida para que la suspensión alcance la longitud usada en la simulación cinemática. En la Figura 4.8 a) se muestra el eslabón dibujado con la longitud necesaria. El eslabón se tiene que ensamblar con una de las vigas. Para realizar el ensamble entre la viga y el eslabón se utilizó un acoplamiento macho-hembra. El macho se coloca en el eslabón 1 y la hembra se coloca en la viga. El ensamble es a presión y utiliza un tornillo para evitar que las piezas se salgan de su lugar. El macho del eslabón se muestra en la Figura 4.8 b). En la parte inferior del eslabón es necesario insertar un eje para las ruedas por lo tanto se requiere de un barreno para insertar el eje y una cavidad para un rodamiento como el mostrado en la Figura 4.8 c). En la Figura 4.9 se muestra el subensamble explosionado del eslabón con una llanta mostrando todos sus componentes enumerados. En la Tabla 4.3 se enlistan los componentes utilizados para el ensamble de la llanta.

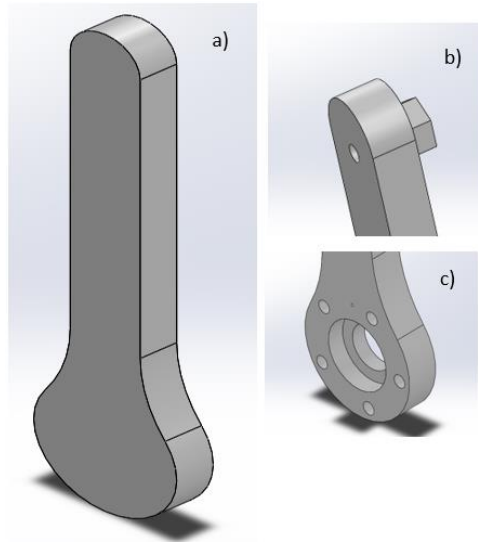


Figura 4.8. a) Eslabón para llanta. b) Hexágono para realizar ensamble con viga. c) Barreno inferior para insertar eje.

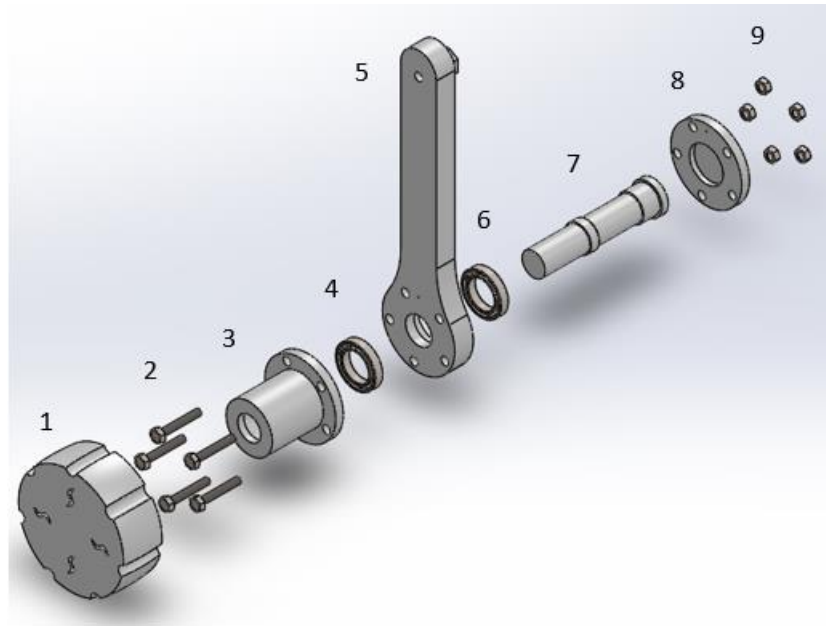


Figura 4.9. Explosión ensamble llanta.

Tabla 4.3. Componentes de ensamble de rueda con eslabón 1.

Componente	Nombre	Función
1	Llanta	Rodar por el terreno de pruebas.
2	Tornillos M4x0.7	Ensamblar los componentes al eslabón.
3	Soporte de eje	Sujetar segundo rodamiento en flecha como segundo apoyo.
4	Rodamiento SKF 61803	Facilitar el rodamiento del eje.
5	Eslabón 1	Ensamblar llanta con eslabón.
6	Rodamiento SKF 61803	Facilitar el rodamiento del eje.
7	Eje de rueda	Guiar movimiento de rueda.
8	Tapa de eje	Evitar que eje y rodamiento salga de cavidad.
9	Tuercas M4x0.7	Ensamblar los componentes al eslabón.

La llanta se une al eje con un ensamble a presión y se evita de esta manera que salga del eje, es por esto por lo que no se utilizan tornillos. Los tornillos y las tuercas que se utilizan sostienen el soporte del eje y la tapa con el fin de mantenerlos en su lugar. En la Figura 4.10 se muestra un corte lateral del ensamble de la rueda para que se puedan apreciar como son colocados los componentes en su lugar. Los rodamientos se ensamblan a presión en el eje, así como en su cavidad correspondiente en el eslabón y en el soporte del eje.

Todas las dimensiones del eslabón 1 y de cada una de las partes mostradas en esta sección se muestran en el Anexo A1 Planos de construcción.

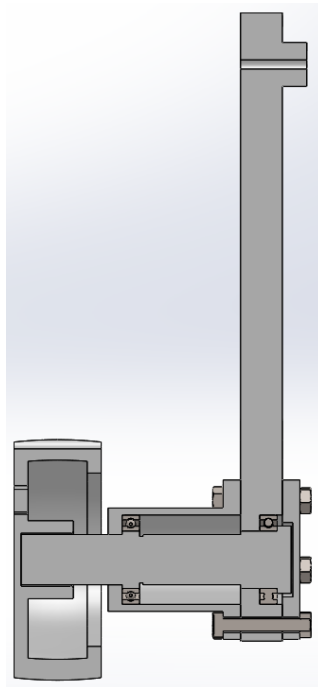


Figura 4.10. Corte lateral ensamble llanta.

4.2.2. Subensamble llanta central

El siguiente subensamble presentado es de la rueda central. Para este ensamble es necesario conectar una llanta como se hizo para el eslabón 1; sin embargo, la llanta central conecta el *Rocker* y el *Bogie* es decir la viga #2 con la viga #3. La dificultad del ensamble se debe a que requiere dos eslabones que conecten ambas vigas a una llanta común. Se muestra en la Figura 4.12 a), b) la vista frontal y la vista superior del modelo simplificado usado para la simulación. Se notan dos aspectos a considerar, de la vista frontal (Figura 4.12 a)) los eslabones 2_1 y 2_2 deben rotar uno respecto al otro, de la vista superior se nota que la viga #2 y la viga #3 están alineadas. En el modelo a ser fabricado mediante manufactura aditiva se tienen que considerar estos dos aspectos. Se diseñó el eslabón 2_1 (Figura 4.11), de la misma manera al subensamble de la llanta frontal o trasera, se utilizó el mismo soporte de eje, el mismo eje y los mismos rodamientos. Como los componentes son los mismos para el eslabón 2_1, los eslabones mostrados en la Tabla 4.3 son los mismos que para el subensamble de la llanta frontal o trasera. El reto en el ensamble de la llanta central es otorgar el segundo grado de libertad. para otorgar el segundo grado de libertad se utilizó un rodamiento y un eje conectado al eslabón 2_2 como se muestra en la Figura 4.13. El rodamiento se fija en su anillo exterior al eslabón 2_1 por el elemento 13 y el anillo interior se fija al eslabón 2_2 por el elemento 11 ver Figura 4.13. En la Figura 4.14 se presenta la vista de explosión del subensamble completo, como se había comentado los elementos del 1 a/ 9 son los mismos para el subensamble de la llanta frontal. En la Tabla 4.4 se enlistan los elementos utilizados para el ensamble de la llanta central.

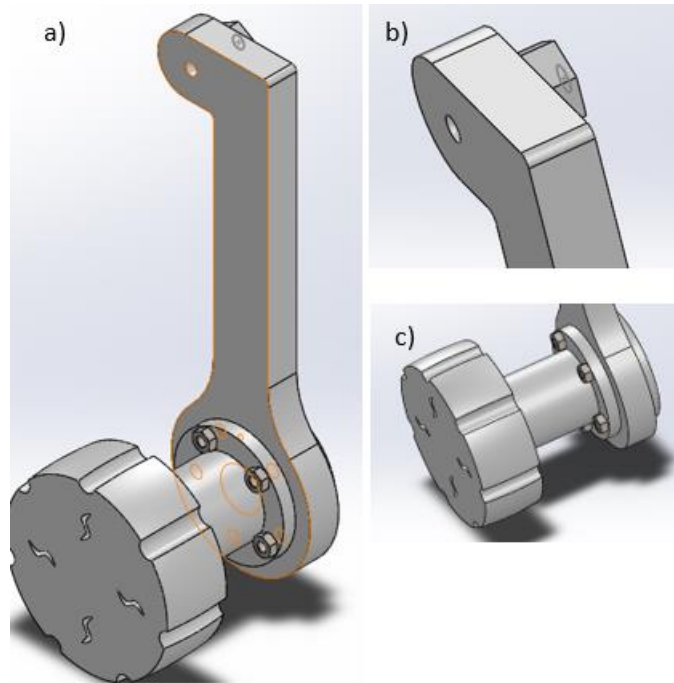


Figura 4.11. a) Eslabón conector viga #3. b) Hexágono para realizar ensamble con viga. c) Ensamble llanta eslabón.

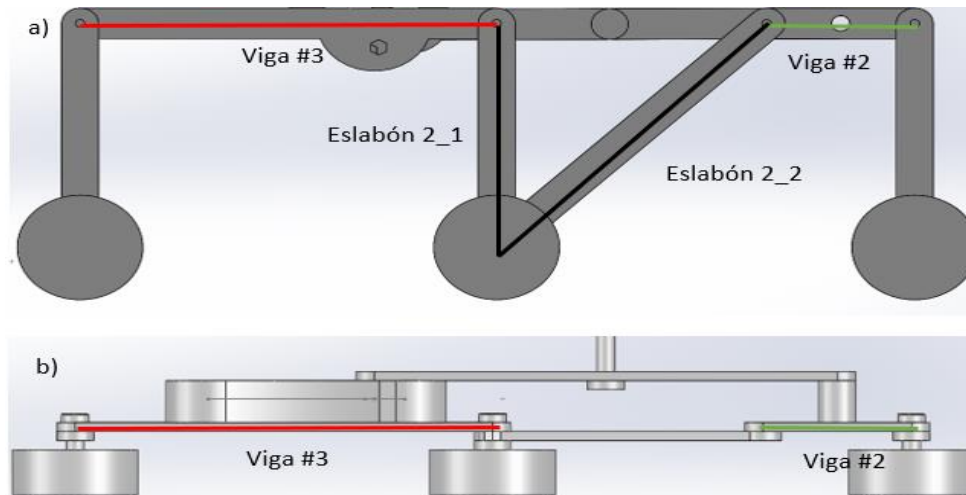


Figura 4.12. a) Vista frontal del modelo simplificado suspensión CIEP_1 2020. b) Vista superior modelo simplificado suspensión CIEP_1 2020.

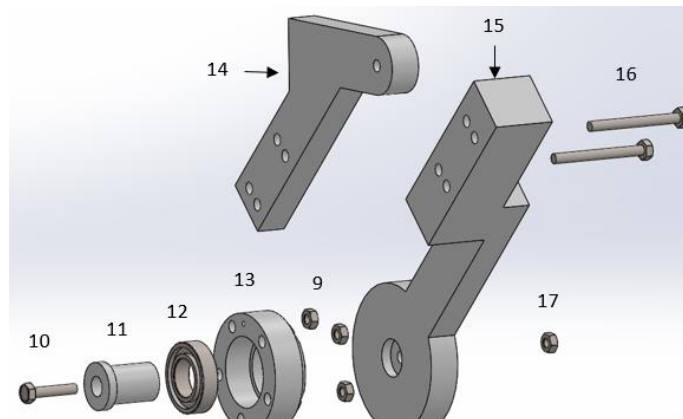


Figura 4.13. Componentes eslabón 2_2.

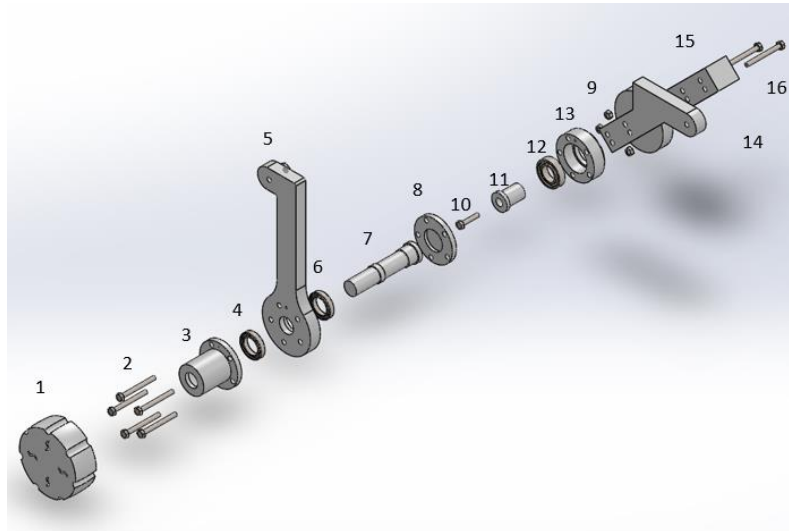


Figura 4.14 Vista de explosión llanta central.

Tabla 4.4. Componentes ensamble rueda central.

Componente	Nombre	Función
10	Tornillo M4x0.7	Fijar anillo interno con eslabón 2_2.
11	Ensamblador anillo interno	Conectar eslabón 2_2 con pista interna de rodamiento.
12	Rodamiento SKF 61902	Otorgar grado de libertad entre eslabón 2_1 y eslabón 2_2
13	Ensamblador anillo externo	Conectar eslabón 2_1 con pista externa de rodamiento.
14	Eslabón 2_1 sección #1	Conectar eslabón 2_2 con viga #2
15	Elemento de alineación y sección #2 del eslabón	Alinear Viga #2 con viga #3
16	Tornillo M4x0.7	Ensamblar elemento de alineación con eslabón 2_2

4.2.3. Subensamble vigas

Los siguientes elementos diseñados para su ensamble son las vigas #2, viga #3, dispositivo deslizador y plataforma de carga. Las dimensiones de las vigas #2 y #3 ya son conocidas. El ensamble de las vigas a los subensambles que contienen las ruedas se muestra en la Figura 4.15. El ensamble de las ruedas con las vigas #2 y #3, es mediante tornillos y los acoplamientos macho y hembra respectivamente. El dispositivo deslizador y el eslabón seguidor requiere un grado de libertad, por lo que se requiere un rodamiento que otorgue el grado de libertad. En la Figura 4.16 se presenta la manera de ensamblar el rodamiento a la viga #2 y al eslabón seguidor el cual es conectado al dispositivo deslizador. En la Tabla 4.5 se muestran los componentes usados. El eslabón seguidor se conecta al dispositivo deslizador, pero es demasiado largo para ser impreso en una sola pieza en una impresora convencional, por lo que se tiene que fabricar en dos piezas. El ensamble del eslabón seguidor y el dispositivo deslizador se muestra en la Figura 4.17, y los componentes usados para su ensamble se enlistan en la Tabla 4.6.

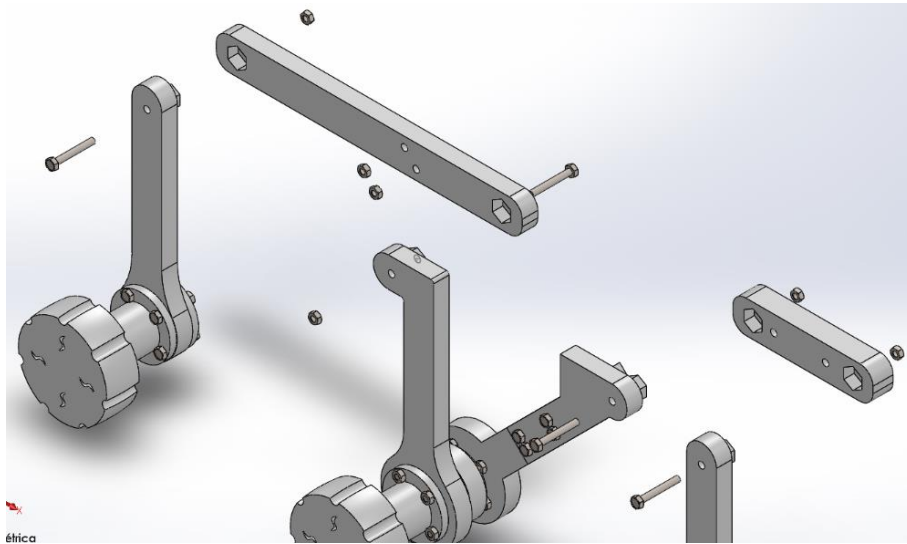


Figura 4.15. Explosión eslabones con ruedas y vigas.

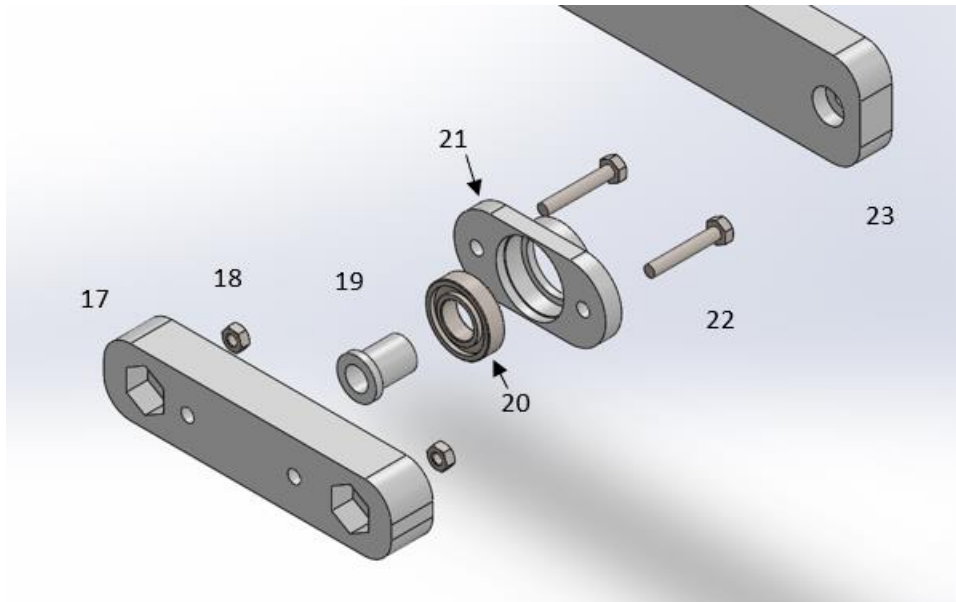


Figura 4.16. Explosión ensamble viga #2 con eslabón seguidor.

Tabla 4.5. Componentes viga #2 con eslabón.

Componente	Nombre	Función
17	Viga #2	Conectar llanta central con llanta frontal.
18	Tuercas M4x0.7	Unir sub-ensamble de ruedas a viga #2.
19	Ensamblador anillo interno.	Conectar pista interna con eslabón seguidor.
20	Rodamiento SKF 61901	Otorgar grado de libertad a eslabón seguidor.
21	Fijador de rodamiento	Evitar movimiento axial del rodamiento.
22	Tornillo M4x0.7	Unir "Fijador de rodamiento" a viga #2.
23	Eslabón seguidor	Conectar la plataforma de carga a mecanismo deslizador.

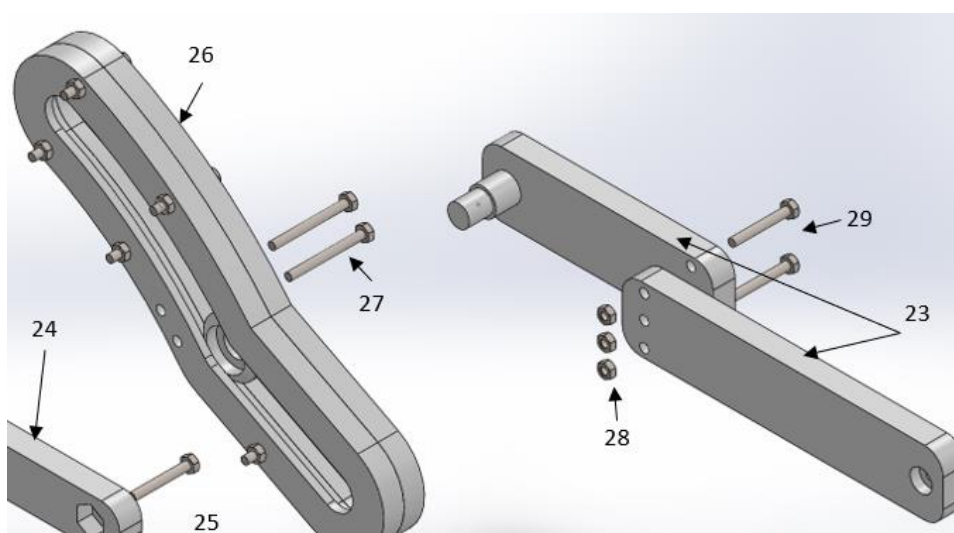


Figura 4.17. Explosión ensamble eslabón seguidor y dispositivo deslizador.

Tabla 4.6. Componentes ensamble eslabón seguidor con dispositivo deslizador.

Componente	Nombre	Función
23	Eslabón seguidor.	Seguir la trayectoria del dispositivo deslizador
24	Viga #3	Conectar llanta trasera con llanta central.
25	Tornillo M4x0.7	Unir sub-ensamble rueda central con viga #3.
26	Dispositivo deslizador	Compensar la inclinación de la plataforma de carga.
27	Tornillo M4x0.7	Unir dispositivo deslizador a viga #3.
28	Tuercas M4x0.7	Unir dos secciones del eslabón seguidor.
29	Tornillo M4x0.7	Unir dos secciones del eslabón seguidor.

Los ensambles mostrados son para uno de los flancos de la suspensión; sin embargo, al ser un diseño simétrico, se utilizan los mismos ensambles con los mismos componentes para el flanco del lado contrario. El último eslabón para completar la suspensión es la plataforma de carga. El trabajo de la plataforma de carga es unir ambos flancos y cargar los instrumentos o equipo requerido de la suspensión. La característica de la plataforma de carga es, tener un grado de libertad rotatorio para permitir el libre movimiento de cada flanco de la suspensión. Se muestra en la Figura 4.18 la manera de ensamblar el rodamiento que permite el movimiento rotacional de cada flanco. Se enlista en la Tabla 4.7 los componentes utilizados para el ensamble y su función.

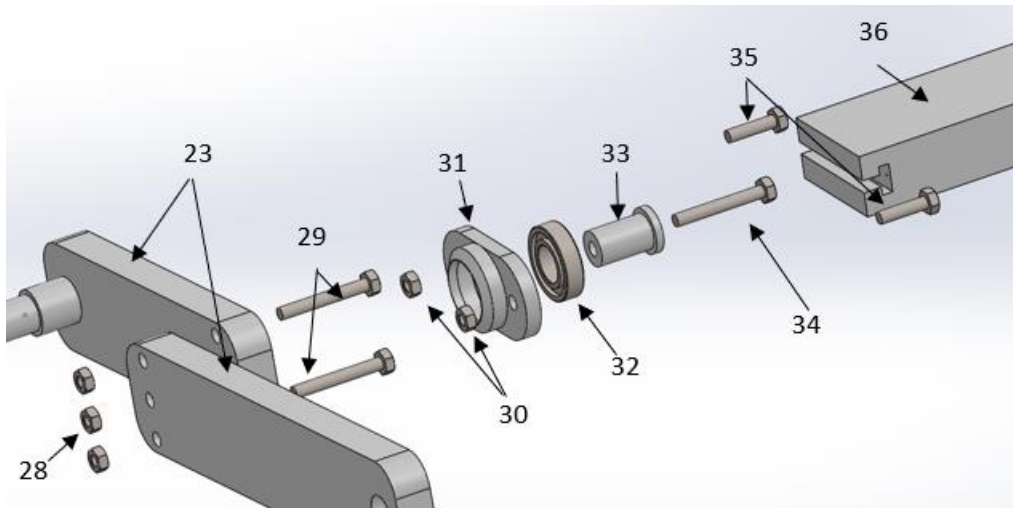


Figura 4.18 Explosión ensamble plataforma de carga.

Tabla 4.7. Componentes ensamble plataforma de carga.

Componente	Nombre	Función
23	Eslabón seguidor	Seguir la trayectoria del dispositivo deslizador.
28	Tuercas M4x0.7	Unir dos secciones del eslabón seguidor.
29	Tornillo M4x0.7	Unir dos secciones del eslabón seguidor.
30	Tuercas M4x0.7	Unir fijador de rodamiento con plataforma de carga.
31	Fijador de rodamiento.	Evitar movimiento axial del rodamiento.
32	Rodamiento SKF 61901	Otorgar grado de libertad rotatorio a plataforma de carga.
33	Ensamblador anillo interno	Conectar pista interna de rodamiento con eslabón seguidor.
34	Tornillo M4x0.7	Unir ensamblador anillo interno y dos secciones de eslabón seguidor.
35	Tornillo M4x0.7	Unir fijador de rodamiento con plataforma de carga.
36	Plataforma de carga	Unir flanco derecho con flanco izquierdo de la suspensión.

El ensamble completo de la suspensión se muestra en la Figura 4.19. La suspensión cuenta con aproximadamente 60 piezas ensambladas en total. El siguiente paso es fabricar las piezas mediante manufactura aditiva. Las dimensiones modeladas se verán afectadas por la tolerancia de la impresora, la solidificación del material, entre otras cosas; por lo que se tienen que realizar pruebas de tolerancia para redimensionar las piezas sobre todo en aquellas donde se ensamblan dos o más piezas. Las pruebas de tolerancia se verán en la siguiente sección de este capítulo.

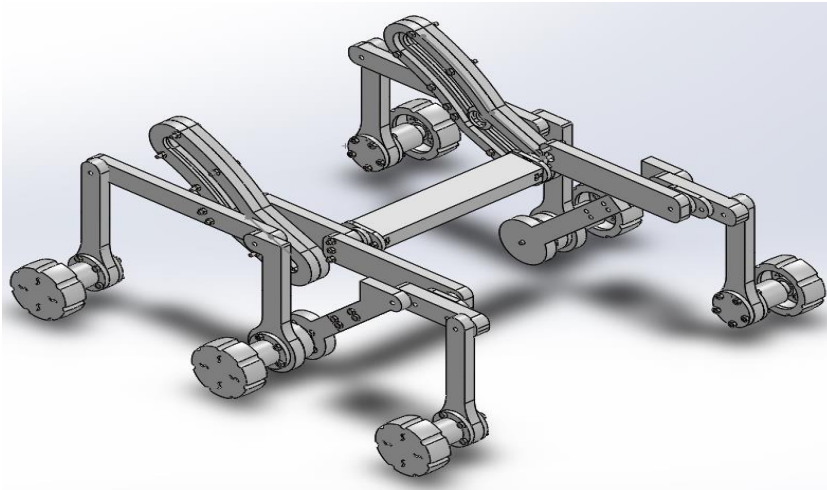


Figura 4.19. CIEP_1 2020 a base de impresión 3D.

4.3. Pruebas de tolerancia por medio de manufactura aditiva para ensamblaje de componentes

La manufactura aditiva mejor conocida como impresión 3D, describe una clase de tecnología de manufactura en la cual el material es añadido capa por capa para producir un objeto tridimensional. La impresión 3D ha ido evolucionando muy rápido, tanto que se cree que en un futuro muy cercano cada casa tendrá una impresora 3D. La manufactura aditiva fue introducida para el desarrollo de prototipos (por lo que se le conoce como “prototipado rápido”) en ingeniería mecánica, pero evolucionó a una clase de tecnología de producción aplicada a todo tipo de industrias incluida la industria biomédica, aeroespacial, calzado, automoción, etc. La impresión 3D no es tecnología nueva ya que existía desde aproximadamente 1980, y la primera compañía, *3D systems*, fue fundada por Chuck Hall en 1986 [49]. Sin embargo, a mediados de los años 2000 el proceso de impresión 3D estaba lleno de patentes y los dueños de las patentes decidieron retener las patentes como tecnología de alto costo dirigida para la industria. Cuando las patentes expiraron, Adrian Bowyer creó un diseño para una impresora 3D que pudiera construir otras impresoras 3D, con la ventaja de que algunas partes podían ser compradas en una ferretería convencional. Así comenzó el *RepRap* (*REPLICating RAPid prototyper*), la revolución de impresoras 3D que lidera las impresoras comerciales en el mercado, siendo una de estas impresoras la utilizada para la generación de las piezas usadas en la suspensión utilizada en esta tesis.

La impresora 3D utilizada para la fabricación de las piezas de la suspensión diseñada es la impresora “Anet A8” mostrada en la Figura 4.20, la cual cuenta con 5 motores, 1 motor para el eje “x”, 1 motor para el eje “y”, 2 motores para el eje “z”, por último 1 motor para el extrusor. El extrusor cuenta con dos secciones, una es el mecanismo de alimentación de material que consiste en sostener el material y empujarlo cuando sea necesario y la otra sección es la boquilla la cual se encarga de fundir el material y depositarlo en la plataforma.

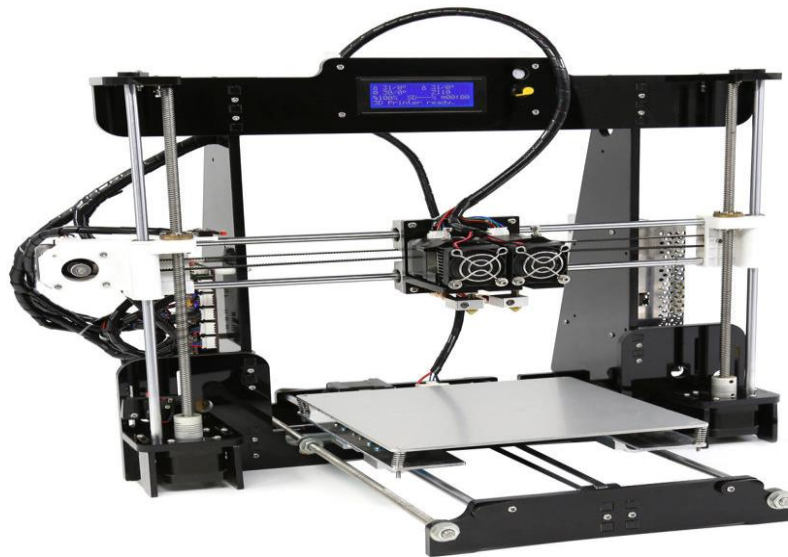


Figura 4.20. Impresora Anet A8.

Como se explicó en la sección 4.2 se tuvieron que considerar varias limitantes y características de la manufactura aditiva. Una de estas consideraciones, la más importante para el ensamble de la suspensión, es la conexión de todos los componentes. La impresora 3D tiene un área efectiva de impresión muy reducida por lo que no se puede imprimir la suspensión en una sola pieza. Recordando que la suspensión cuenta con aproximadamente 60 piezas ensambladas en total por lo que hay que realizar varias pruebas de tolerancia.

El modelo CAD presentado en la sección 4.2 es con dimensiones ideales considerando que las piezas impresas tendrán las mismas dimensiones que las dibujadas y ensamblarán sin ningún tipo de ajuste. Sin embargo, las dimensiones de las piezas fabricadas cambian debido a que el plástico se contrae, por lo que sus dimensiones tienen que ajustarse.

La metodología para hacer las pruebas de tolerancia es realizando las formas geométricas que se ensamblarán, por ejemplo, para los hexágonos con los que se unirán las vigas y los eslabones que llevarán las ruedas. La metodología consiste en variar las dimensiones de una de las piezas ya sea la hembra o el macho en este caso se varían las dimensiones de la hembra (Figura 4.21). Las dimensiones de la hembra se propusieron a partir del macho, es decir la dimensión que tiene el macho se fue incrementando, pero en un barreno. La dimensión se incrementó debido a que las piezas se contraen cuando se imprimen. Si las dimensiones propuestas no son satisfactorias se proponen nuevas dimensiones, pero a

partir del barreno que se ajusta mejor a la pieza macho. La pieza con el macho se muestra en la Figura 4.22 y no se varían sus dimensiones. Las piezas para la prueba de tolerancia son de menor volumen y ocupan menos material que las piezas de la suspensión con el fin de imprimir las piezas finales con las dimensiones adecuadas y sin desperdiciar material.

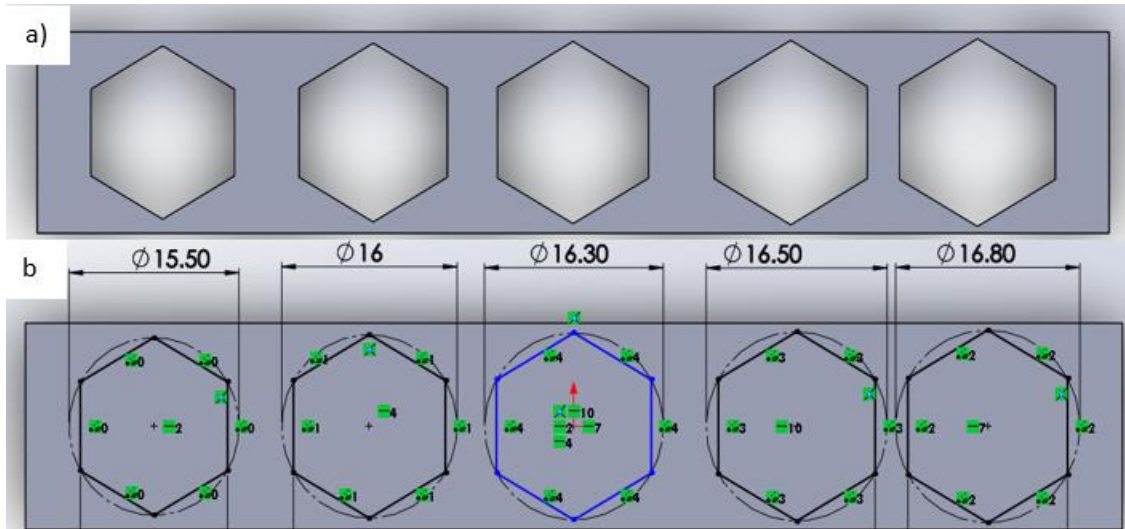


Figura 4.21. a) Pieza hembra para pruebas de tolerancia. b) Dimensiones de los barrenos.

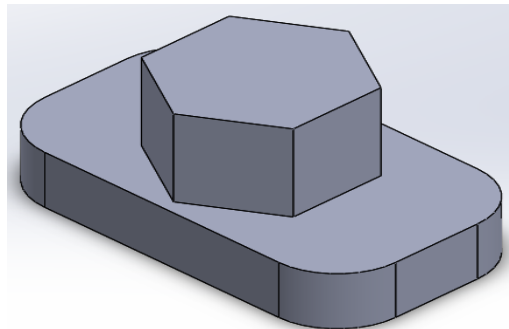


Figura 4.22. Pieza macho para pruebas de tolerancia.

Para las dimensiones consideradas, el hexágono macho ensambla con interferencia con el barreno de 16.5 mm de diámetro como se muestra en la Figura 4.23. Por lo tanto, el modelo de la suspensión se redimensiona con base en estos resultados para su fabricación por impresión 3D.



Figura 4.23. Prueba de ensamble.

Para cada ensamble se utiliza la misma metodología.

1. Impresión de piezas con dimensiones propuestas para un ensamble por interferencia.
2. Hacer la prueba de ensamble.
3. Si la pieza macho no ensamble por interferencia se imprimen más piezas aumentando o disminuyendo las dimensiones según sea el caso.
4. Repetir paso 2 y 3 hasta encontrar las dimensiones adecuadas.

En todas las impresiones se utilizaron los parámetros de impresión mostrados en la Tabla 4.8, y se variaron las dimensiones de las piezas. Para cada ensamble se obtiene la dimensión de la hembra para que el componente macho tenga un ajuste por interferencia.

Tabla 4.8 Parámetros de impresión.

Parámetros	
Altura de capa	0.2 mm
Densidad de relleno	5%
Ángulo de relleno	45°
Temperatura del extrusor	200°C
Temperatura cama	58°C
Velocidad de relleno	60mm/s
Velocidad de impresión de perímetros	70mm/s

Las dimensiones encontradas de las pruebas de tolerancia se muestran en la Tabla 4.9. Se observa en la Tabla 4.9 que las dimensiones para un ensamble por interferencia varían de 0.5 mm a 0.8 mm es decir las longitudes nominales de la suspensión se reducen de 0.5 mm a 0.8 mm debido al efecto de contracción por enfriamiento del plástico.

Tabla 4.9. Dimensiones para ensamble con interferencia.

Ensamblajes	Macho (mm)	Hembra (mm)
	Ø 4	Ø 4.85
	Ø externo 26	Ø 26.5
	Ø 17.1	Ø interno 17
	Ø Externo 28	Ø 28.7
	Ø 14.55	Ø interno 15
	Ø 15	Ø 15.8
	Ø Externo 24	Ø 24.57
	Ø 11.48	Ø interno 12
	Ø Externo 21	Ø 21.5
	Ø 11.75	Ø Interno 12
	Ø 11.9	Ø 11.48

4.4. Ensamble de suspensión

Al contar con las piezas de la suspensión, los tornillos y rodamientos, se procedió a ensamblar el sistema. En la Figura 4.24 a) se muestra el subensamble de la llanta frontal la cual cuenta con 2 rodamientos, 6 tornillos, la rueda, su respectivo eje y 1 eslabón. En la Figura 4.24 b) se muestra el ensamble de la rueda central que cuenta con 3 rodamientos, 10 tornillos, 2 ejes, 1 rueda y 2 eslabones. En la Figura 4.24 c) se muestra la suspensión completa es decir los dos flancos de la suspensión (llanta central, llanta frontal y trasera, vigas y plataforma de carga) conectados mediante dos soportes.



Figura 4.24. Ensamblajes a) Llanta frontal. b) Llanta central. c) Suspensión completa.

En este capítulo se proponen las dimensiones de los eslabones de la suspensión. Se calculó el esfuerzo de los eslabones considerando una carga de 10 Kg. Sobre la plataforma de carga y se demuestra que las dimensiones propuestas soportan la carga. Se presentó el diseño de los componentes y subensambles. Se enlistaron los componentes utilizados para el ensamble de la suspensión completa. Se presentó la metodología de las pruebas de tolerancia y se presentaron las dimensiones encontradas para los ensambles. En el siguiente capítulo se presentarán las pruebas experimentales del prototipo.

5

5. Validación experimental y discusión de resultados

5.1. Enfoques preliminares de validación experimental

Una vez construida la plataforma física, se procede a evaluar su comportamiento cinemático y correspondencia con la simulación. Con objeto de validación se realizaron pruebas experimentales y se midió el ángulo de la plataforma conforme avanzaba en el terreno de pruebas.

Para realizar la validación experimental de la plataforma se enfocó el trabajo en obtener la medición del ángulo de inclinación de la plataforma. El ángulo de inclinación es el parámetro que se utiliza para comparar el desempeño de la suspensión CIEP_1 (2020) con otras suspensiones. Los métodos utilizados para la medición del ángulo se basaron en los siguientes sensores:

1. *IMU* (Unidad de medición inercial).
2. *Encoder* AMT102-V.
3. Transportador.
4. Burbuja digital.

5.1.1. Método 1: unidad de medición inercial

Para la medición del ángulo utilizando una *IMU* (MPU6050) es necesario la creación de un programa para el procesamiento de los datos obtenidos por la *IMU*. El MPU6050 tiene incorporado un giroscopio y un acelerómetro. Para la obtención del ángulo de inclinación del *IMU* es necesario realizar cálculos de los datos obtenidos por la tarjeta de adquisición de datos (*Arduino UNO*). Se calibró la *IMU* utilizando un código de *Arduino* el cual obtiene valores de *offset* mientras la *IMU* está fijo en una superficie horizontal. Los valores de *offset* se colocan en otro código del cual se obtendrán los ángulos *pitch*, *roll* y *yaw*. Los valores obtenidos por la *IMU* tienen que ser procesados por la tarjeta de adquisición de datos, es decir tienen que pasar por un filtro complementario para reducir el error del acelerómetro y del giroscopio. Es necesario verificar si la medición con la *IMU* es correcta antes de montarla en la suspensión. Para la verificación se creó un dispositivo, diseñado a manera de péndulo invertido donde se ensambló la *IMU* y se posicionó el transportador a manera de poder validar la medición con respecto al transportador, ver Figura 5.1. El funcionamiento del dispositivo es girar el eslabón pivoteado y medir el ángulo con respecto a la horizontal usando el transportador para compararlo con los valores procesados por la *IMU* a través de la tarjeta de adquisición de datos. Los datos obtenidos por la *IMU* y los medidos en el dispositivo se muestran en la Tabla 5.1. En esta tabla la primera columna, llamada “Dispositivo”, reporta el ángulo de inclinación medido con un transportador (medida de referencia). La columna central, llamada “*IMU*”, es la medida obtenida por el *IMU* gracias al procesamiento digital de los datos. La tercera columna llamada “Delta” es la diferencia entre la medida de referencia y el obtenido por la *IMU*.

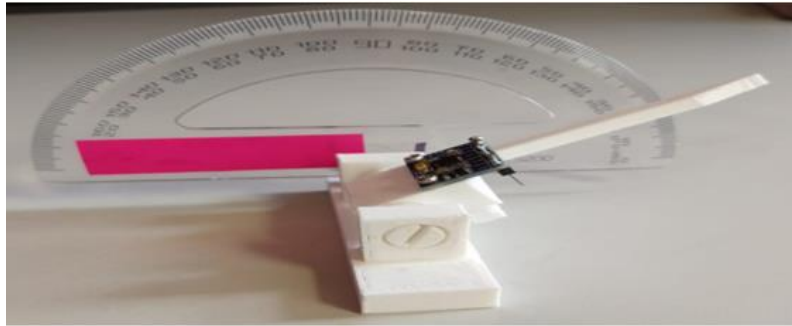


Figura 5.1. Sensor MPU6050 con dispositivo para verificación de medición.

Los resultados mostrados en la Tabla 5.1 indican que el ángulo obtenido por la unidad de medición inercial (*IMU*) tienen un desfase de las mediciones obtenidas por el transportador. Conforme el ángulo aumenta el desfase aumenta. Como la diferencia de la medición entre el dispositivo y el *IMU* no es lineal no se puede utilizar para medir la inclinación de la plataforma. El error en la medición se debe al procesamiento de los datos; por lo que es necesario utilizar técnicas de filtrado, como pudiera ser los filtros de Kalman para obtener una medición precisa, pero para llevar acabo esto se requiere de otra tarjeta de adquisición de datos y un programa más robusto, por lo cual se consideró fuera de los alcances de este trabajo.

Tabla 5.1. Datos obtenidos por la *IMU* comparado con el dispositivo.

Dispositivo (°)	<i>IMU</i> (°)	Delta (°)
20	17.9	2.1
25	22.1	2.9
30	26.06	3.94
35	30.2	4.8
40	34.6	5.4
45	39	6
50	43.7	6.3
55	48.4	6.6
60	52.9	7.1
65	57.7	7.3
70	63.4	6.6
75	68.5	6.5
80	73.7	6.3
85	78.6	6.4
90	83.8	6.2

5.1.2. Método 2: *Encoder* AMT102-V

La segunda propuesta de validación experimental es utilizando un *encoder*, específicamente el *encoder* AMT102-V de tipo rotatorio, incremental con una resolución de 2048 PPR y una señal de salida de cuadratura. El *encoder* se acopló a la junta rotativa del eslabón seguidor mostrado en la Figura 5.2. La función de la junta rotativa es otorgar movimiento al eslabón seguidor para su desplazamiento en el dispositivo compensador. La rotación de la junta rotativa es igual a la inclinación de la plataforma de carga. Para el ensamble del *encoder*, se modificó un eslabón de la suspensión y se ensambló como se muestra en la Figura 5.3. La adquisición de datos por parte del *encoder* se realizó utilizando una tarjeta *myRIO* de *National Instruments*®. El ángulo registrado para la llanta frontal fue de 13°, para la llanta central fue de 4° y para la llanta trasera fue de 13°. Al analizar la causa del por qué la llanta frontal y trasera tenían el mismo ángulo se encontró que la junta rotativa gira lo mismo para ambas llantas independientemente de cual llanta se encuentre sobre el obstáculo. La compensación del ángulo de inclinación de la plataforma de carga se debe al dispositivo deslizador. La junta rotativa otorga el grado de libertad necesario para poder recorrer el dispositivo deslizador, la llanta frontal y trasera provocan el mismo giro a la junta rotativa por lo que utilizar el *encoder* para la medición del ángulo de inclinación se descarta.

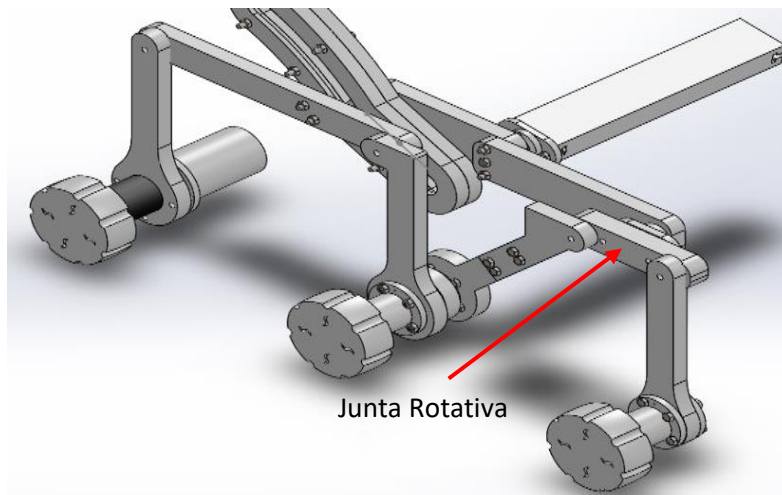


Figura 5.2. Junta rotativa en plataforma de carga.



Figura 5.3. Encoder AMT102-V montado en junta rotativa de plataforma de carga

Los métodos 1 y 2 descritos anteriormente no fueron satisfactorios. El método 1 daba resultados erróneos y el error no era lineal. El método 2 no medía directamente el ángulo de inclinación de la plataforma. Implementar los métodos 1 y 2 de una manera funcional requiere equipamiento y conocimiento fuera de los alcances de este trabajo por ello se decidió explorar las siguientes metodologías para la medición del ángulo de inclinación y que se presenta en la siguiente sección.

5.2. Enfoques funcionales de validación experimental

5.2.1. Método 3: Transportador como instrumento de medición

En este tercer método se utilizaron los siguientes materiales: transportador, papel bond, escuadra y uno de los flancos de la suspensión. En el diseño original de la suspensión se consideró únicamente que pudiera usarse para sobrepasar obstáculos simétricos, es decir lo que sucede en un flanco sucede en el otro; la suspensión CIEP_1 (2020) trabaja en terrenos simétricos, el utilizar menos componentes garantiza y simplifica la medición del ángulo. La metodología fue la siguiente: se colocó el papel cuadriculado sobre el suelo, sobre el papel se dibuja una línea recta y un cuadrado del tamaño de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas como se muestra en la Figura 5.4. La línea recta y el cuadrado dibujado representan el suelo y el obstáculo. Se elige el obstáculo tipo tope de tamaño de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las ruedas debido a que es el que muestra la mayor irregularidad del terreno. Se colocó la suspensión de manera lateral sobre el suelo, ver Figura 5.5, los soportes que se observan en la imagen son para efectos de sostener verticalmente el flanco. Se colocó una de las llantas de la suspensión sobre el obstáculo dibujado mientras las otras dos se alinean a la línea recta que representa el suelo. Una vez alineadas las tres ruedas al borde de las líneas dibujadas se utiliza una escuadra para colocar tres marcas a lo largo del eslabón que llevara la plataforma de carga. Se colocó la escuadra sobre el suelo y en la orilla del eslabón para así poder colocar una marca sobre el papel cuadriculado. Se colocaron las marcas a lo largo del eslabón para poder generar una línea recta uniendo tres marcas como se muestra en la Figura 5.6. Se estudian tres casos de medición los cuales son los siguientes:

- Caso 1: llanta frontal sobre obstáculo.
- Caso 2: llanta central sobre obstáculo.
- Caso 3: llanta trasera sobre obstáculo.

En la Figura 5.7 se muestra la suspensión donde se etiquetan las llantas “frontal”, “central” y “trasera”. Una vez que se trazaron las líneas para cada caso se utilizó el transportador para medir el ángulo con respecto al suelo como se observa en la Figura 5.8. En la Figura 5.9 se pueden ver las tres líneas generadas con sus respectivos rótulos para identificar cada caso.

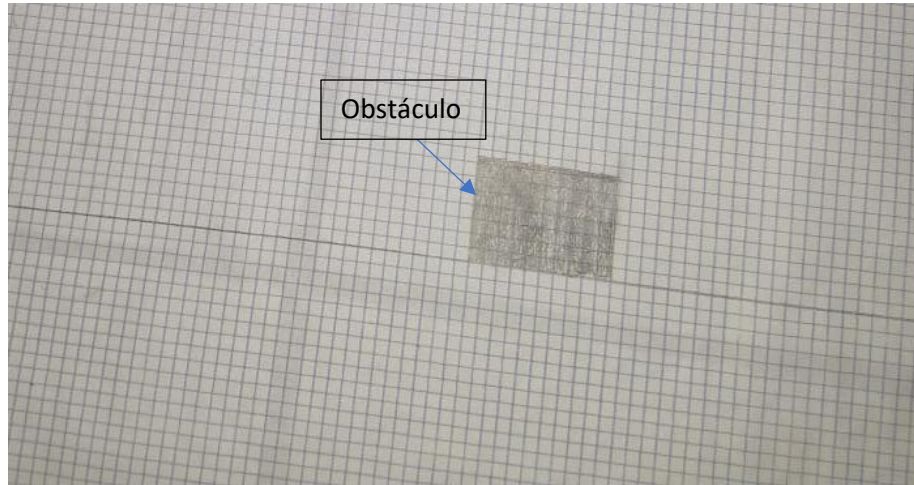


Figura 5.4. Líneas de referencia para metodología de medición manual.

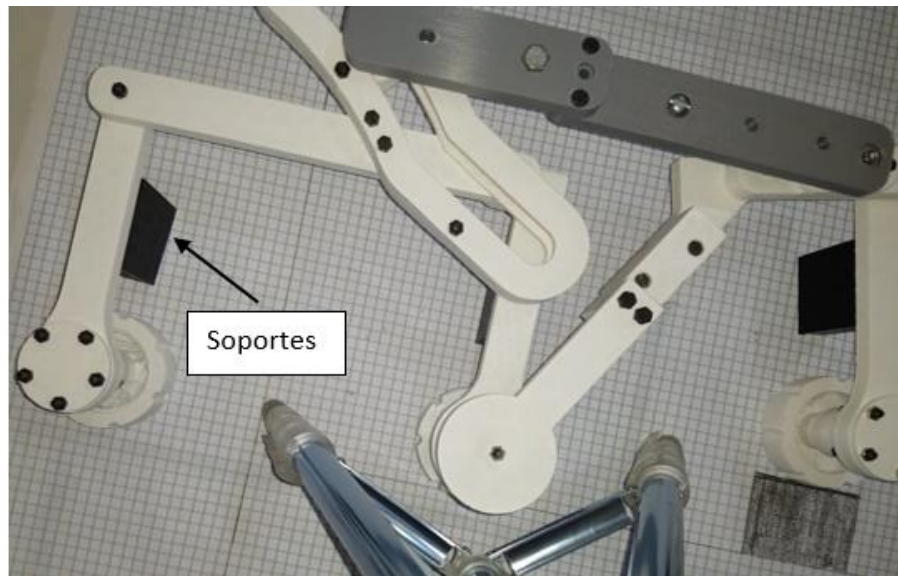


Figura 5.5. Colocación y alineación de suspensión CIEP_1 2020 sobre papel cuadriculado.

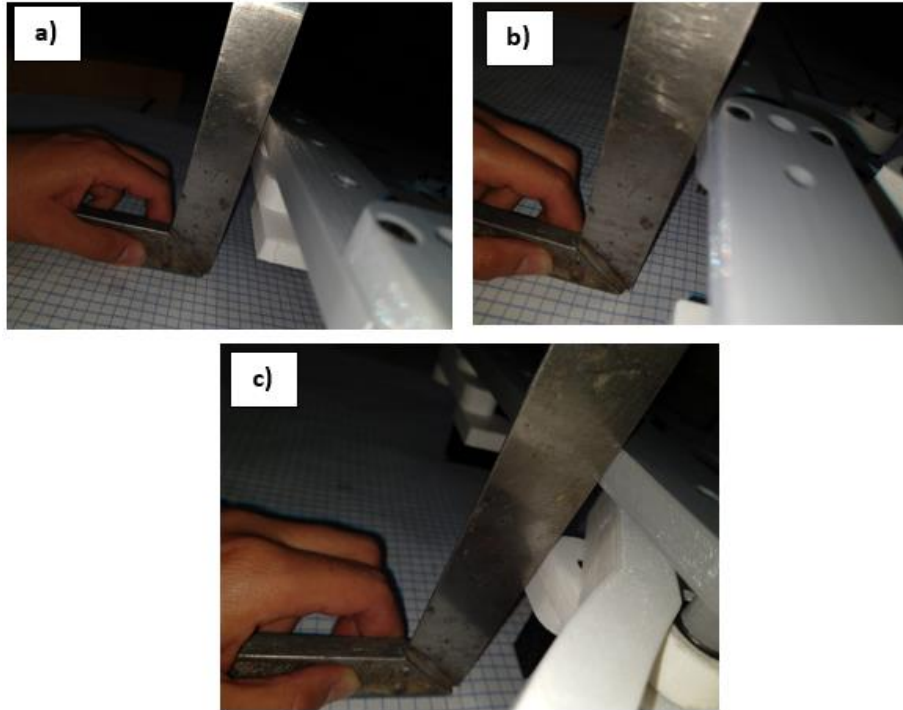


Figura 5.6. Generación de marcas: a) Marca inicio eslabón seguidor, b) Marca mitad eslabón seguidor, c) Marca final de eslabón seguidor.

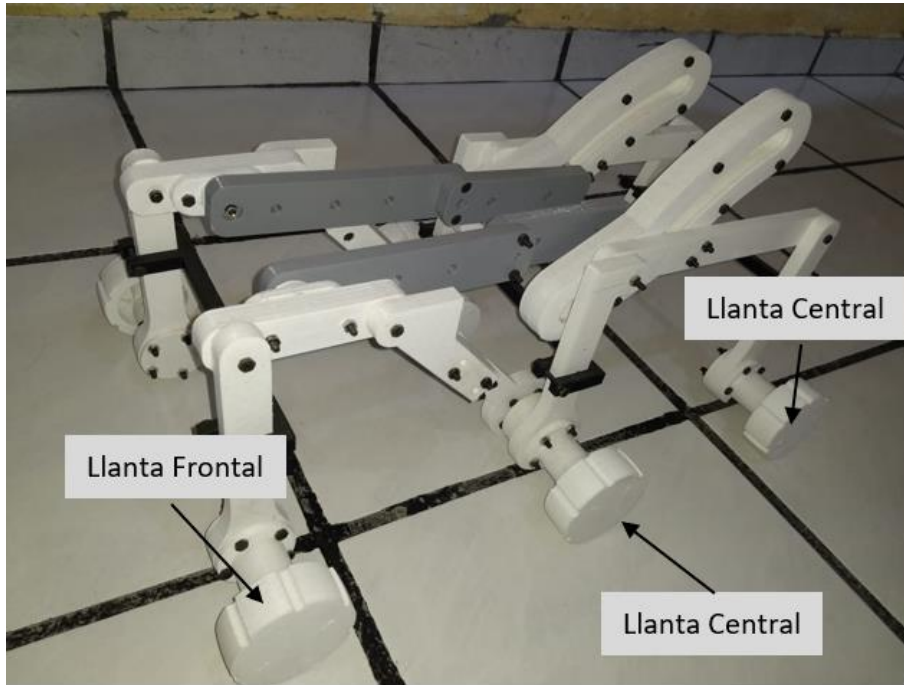


Figura 5.7. Llantas correspondientes a suspensión.

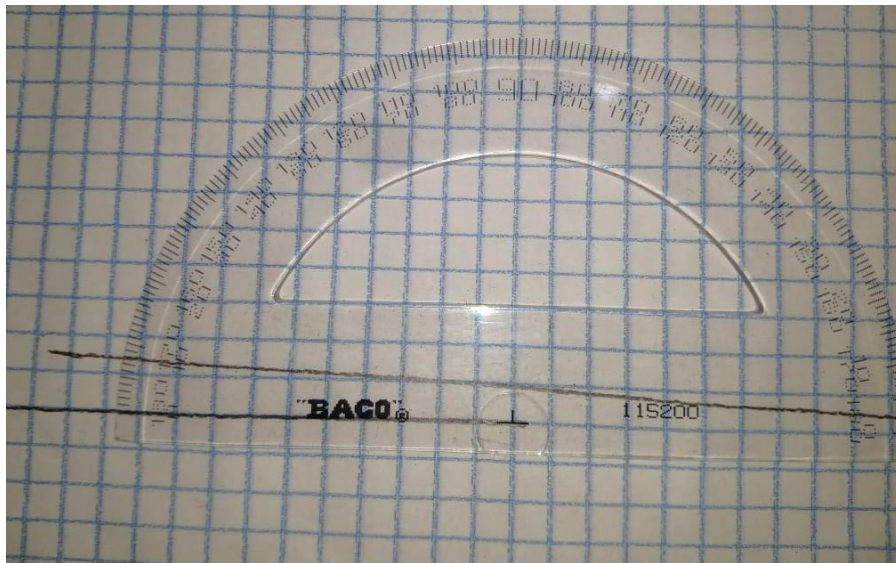


Figura 5.8. Medida de ángulo respecto a la horizontal cuando llanta frontal sobre obstáculo.

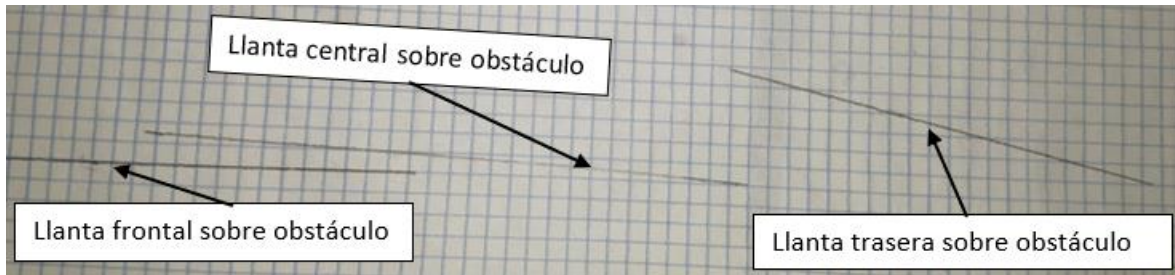


Figura 5.9. Líneas generadas para cada una de las llantas sobre el obstáculo.

El método 3 es confiable en su medición, a pesar de esto, es tedioso y requeriría mucho tiempo para la validación del terreno de pruebas completo. Se busca un último método que sea confiable y a su vez sencillo para poder evaluar el desempeño de la suspensión en todo el terreno.

5.2.2. Método 4: Burbuja digital

Para este método se utilizó la aplicación *AngleMeter-PROPlus*® de *Android*. La metodología utilizada es la siguiente: Se colocó la suspensión CIEP_1 2020 en el suelo, los flancos de la suspensión para la validación experimental se colocan a una distancia donde pueda ponerse un celular en los eslabones de la plataforma de carga (eslabones seguidores), (ver Figura 5.10) se puede observar que la pantalla del celular muestra un ángulo de inclinación de cero grados. El ángulo de inclinación mostrado en la aplicación es el ángulo formado con respecto a la horizontal. Para esta prueba se colocó cada una de las llantas de la suspensión sobre un obstáculo de manera manual como se muestra en la Figura 5.11. El obstáculo tiene la altura de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las ruedas, de la misma manera como el primer obstáculo del terreno de pruebas simulado en el capítulo 2. Al igual que en el método 3 se utilizó este tipo de obstáculo debido a que se estableció su dimensión como uno de los requisitos de diseño.

Para poder validar el uso de esta aplicación (*AngleMeter-PROPlus*®) se usó un transportador y se colocó el celular sobre un objeto. El celular mostraba en la pantalla el ángulo de inclinación del celular (10°). Se colocó el transportador en la orilla lateral del celular y el centro del transportador se alineó al final del celular como se muestra en la Figura 5.12. La línea azul indica el centro del transportador y se alinea en el punto donde toca el celular el suelo. El ángulo leído en el transportador es de 10° igual a lo que indica la pantalla del celular.

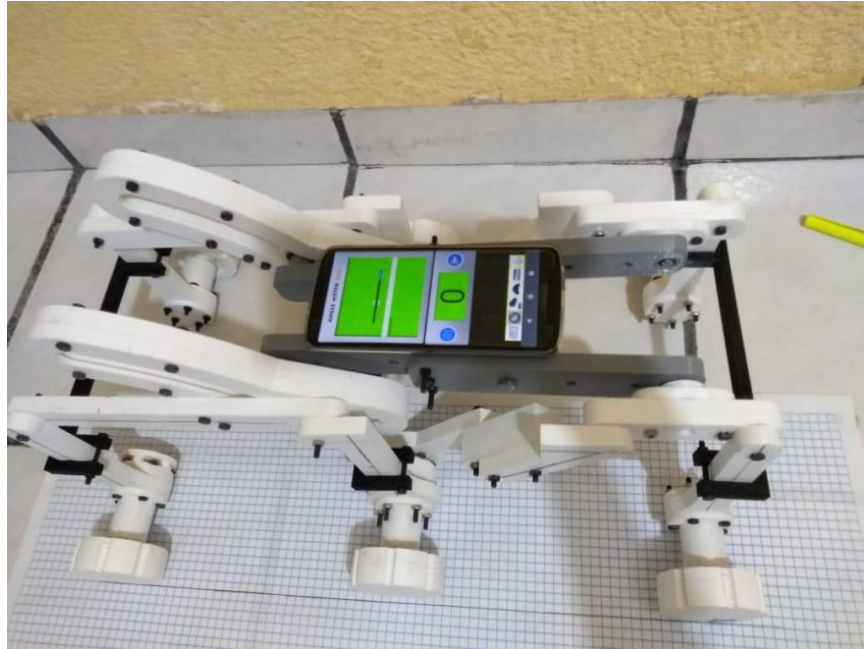


Figura 5.10. Suspensión sobre el suelo y celular colocado sobre plataforma de carga.

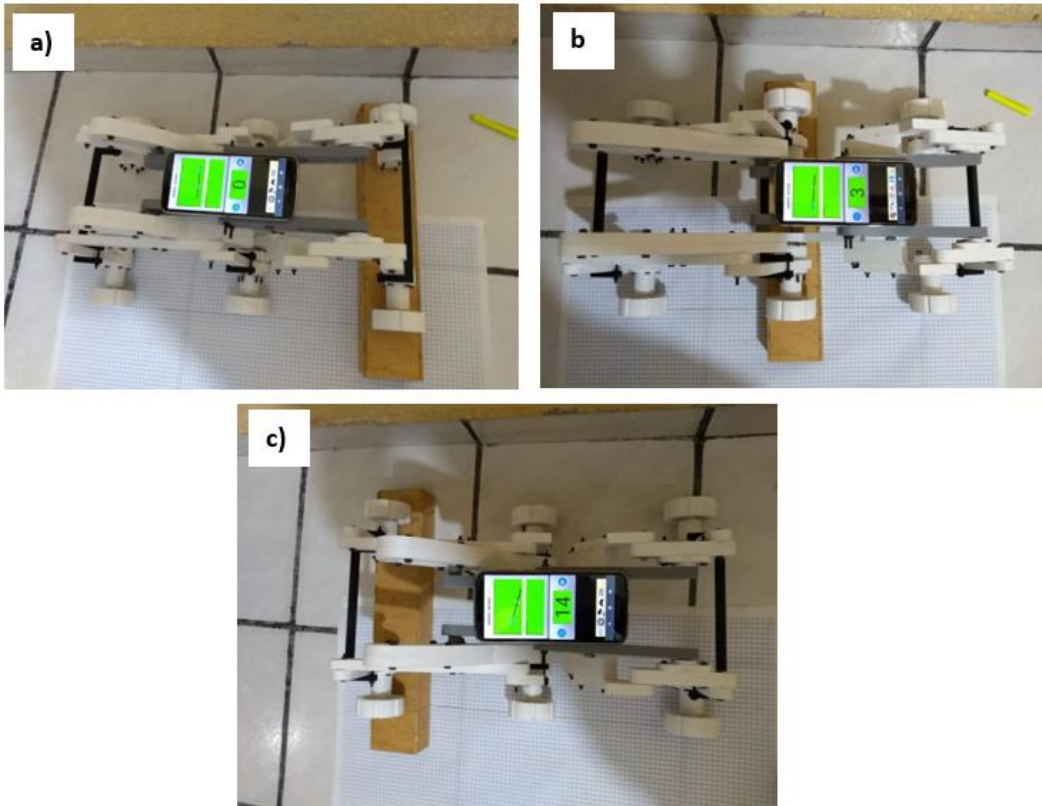


Figura 5.11. Mediciones: a) llantas frontales sobre obstáculo. b) llantas centrales sobre obstáculo. c) llantas traseras sobre obstáculo.

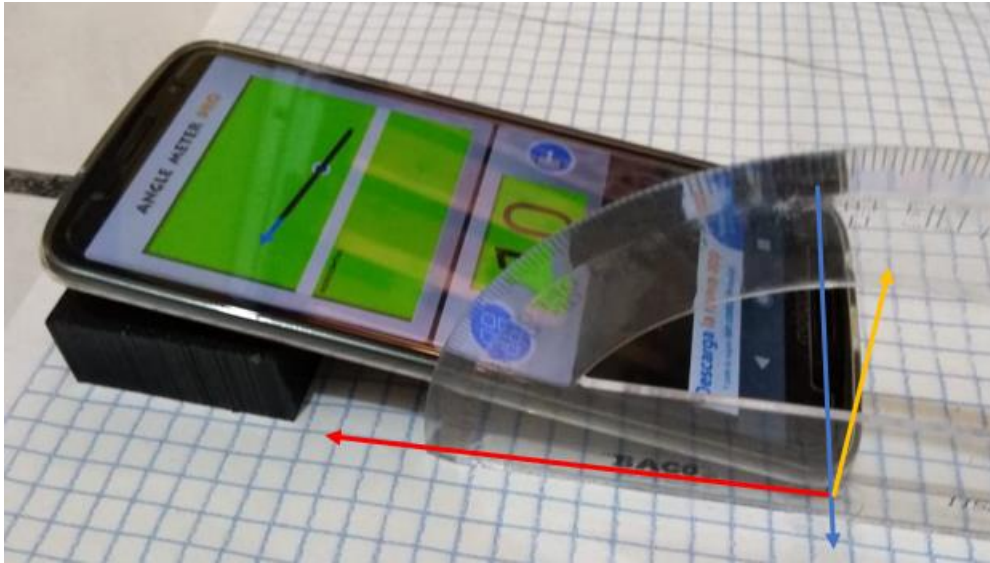


Figura 5.12 Marco de referencia para validación de aplicación.

5.3. Resultados de los diferentes métodos de medición propuestos

Los resultados de los métodos 1 y 2 no dieron resultados de utilidad para validar la suspensión ya que se obtenían resultados erróneos en sus mediciones. Para la correcta implementación del método 1 era necesario equipo con más capacidad de procesamiento y el desarrollo de un filtro de Kalman. Para la correcta implementación del método 2 era necesario modificar partes de la suspensión para ensamblar el *encoder* y poder obtener mediciones correctas. Por dichas razones se decidió buscar otros métodos capaces de medir el ángulo de inclinación de la plataforma sin necesidad de modificar la suspensión y que requirieran menos tiempo de implementación y por ello no se reportan. Una vez medidos los ángulos por diferentes métodos, fue necesario corroborar que la simulación de la suspensión CIEP_1 (2020) hecha en *SolidWorks®* y el prototipo físico se comportaran de la misma manera. En la Tabla 5.2 se muestran los ángulos encontrados de manera experimental por los dos métodos que otorgan medidas confiables (método 3 y 4), los ángulos obtenidos en la simulación y la diferencia entre los ángulos medidos y el ángulo de la simulación. El error se determina restando el ángulo medido experimentalmente y el ángulo de simulación. Recordando que para la validación de los métodos de medición se utilizó el obstáculo de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. Como se puede observar en la Tabla 5.2 la diferencia entre los ángulos medidos es del orden de un grado y no es visible a simple vista. La mayor diferencia entre ángulos se presenta con el método 3 en la llanta central. El ángulo de 1.12° de diferencia es considerado aceptable debido a la resolución del transportador que se utilizó como instrumento de medición cuya resolución es 1° . En la medición de la llanta central sobre el obstáculo la línea generada utilizando el método 3 está entre la línea de 3° y 4° del transportador por lo que se redondeó a 4° . Por esta razón es que los ángulos obtenidos experimentalmente son considerados válidos ya que muestran diferencias de décimas entre la simulación y la medición, lo que representa un error dentro de la resolución del instrumento de medición. El método 4 al tener menos

manipulación en la medición del ángulo a diferencia del método 3 es menos propenso a errores por parte de la persona que mide el ángulo además es más rápido y muestra resultados en tiempo real por lo que lo hace el método seleccionado para medir la inclinación de todos los obstáculos del terreno.

Tabla 5.2. Tabla comparativa ángulos de la plataforma de carga obtenidos experimentalmente contra simulación.

Llanta sobre obstáculo	Método 4 (°)	Método 3 (°)	Simulación SolidWorks® (°)	Diferencia Método 4 vs SolidWorks (°)	Diferencia Metodo 3 vs SolidWorks (°)
Tres llantas en el suelo	0	0	0	0	0
Llanta #1 (Frontal)	0	0	0.24	0.24	0.24
Llanta#2 (Central)	3	4	2.88	0.12	1.12
Llanta #3 (Trasera)	14	13	13.41	0.59	0.41

5.4. Prueba experimental sobre todos los obstáculos del terreno de pruebas

Para las pruebas físicas de la suspensión, al ser ésta una suspensión pasiva y no contar con motores en las ruedas, se colocó la suspensión sobre los obstáculos manualmente para realizar la validación usando la aplicación de *Android* (método 4). Para evitar la construcción del terreno completo se construyeron cubos de madera del tamaño de los obstáculos. Los obstáculos fueron construidos utilizando las dimensiones mencionadas en la sección 2.2 del terreno de pruebas. En la *Figura 5.13* se muestra el terreno de pruebas con sus respectivas secciones enumeradas. Se construyeron cuatro cubos, dos para cada flanco de la suspensión. Se utilizan diferentes casos para la medición de los ángulos, los casos fueron descritos en la sección 3.3 del capítulo 3. La metodología fue la siguiente: se suben las llantas sobre los obstáculos manualmente. Se colocó el celular con la aplicación *AngleMeter-PROPlus*. Las pruebas de la suspensión sobre cada obstáculo del terreno de pruebas se muestran en la *Figura 5.14*. Para el bache de 30 mm de profundidad se crearon cuatro cubos para dos pares de llantas como se muestra en la *Figura 5.14 (c-e)*. Las llantas sobre los cubos representan el nivel del suelo y la llanta sin cubos representa el bache. La *Figura 5.14 (f-h)* representan la subida de la rampa y el último escalón del terreno de pruebas respectivamente.

El terreno de pruebas consta de 5 secciones enumerados en la *Figura 5.13*. La sección 1 considera un obstáculo tipo tope con altura de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. La sección 2 cuenta con un obstáculo tipo escalones, cada escalón tiene la mitad de la altura del obstáculo en la sección 1. La sección 3 muestra un obstáculo tipo bache u hoyo de 30 mm de profundidad. La sección 4 considera un obstáculo tipo rampa de 20° de inclinación. La sección 5 tiene un obstáculo tipo caída de 25 mm de altura.

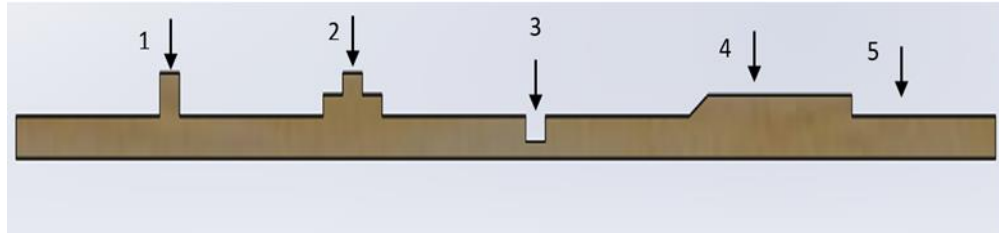


Figura 5.13. Terreno de pruebas.

Se seleccionaron los siguientes casos para la medición del ángulo de inclinación en la plataforma de carga en el terreno de pruebas. En la sección 1 se mide el ángulo de inclinación cuando cada una de las llantas se encuentra sobre el obstáculo, recordar que este ángulo se midió en la validación de los diferentes métodos de validación. En la sección 2 se miden dos ángulos, cuando la llanta frontal está en el escalón de la derecha y la llanta central está en el escalón de la izquierda, y cuando la llanta central está en el escalón de la derecha y la llanta trasera está en el escalón de la izquierda (Figura 5.14 a) b), en la sección 3 los tres ángulos a medir es cuando cada una de las llantas están dentro del bache (Figura 5.14 c) d) e), en la sección 4 se mide un ángulo, cuando las llantas frontal y central ya subieron la pendiente y la llanta trasera aun no lo hace (Figura 5.14 f)), en la sección 5 se miden dos ángulos: cuando la llanta frontal bajó el escalón y las demás aún se encuentran en la sección 4 (Figura 5.14 g) y el último ángulo a medir es cuando la llanta trasera está en la sección 4 y la llanta frontal y central están en la sección 5 (Figura 5.14 h).

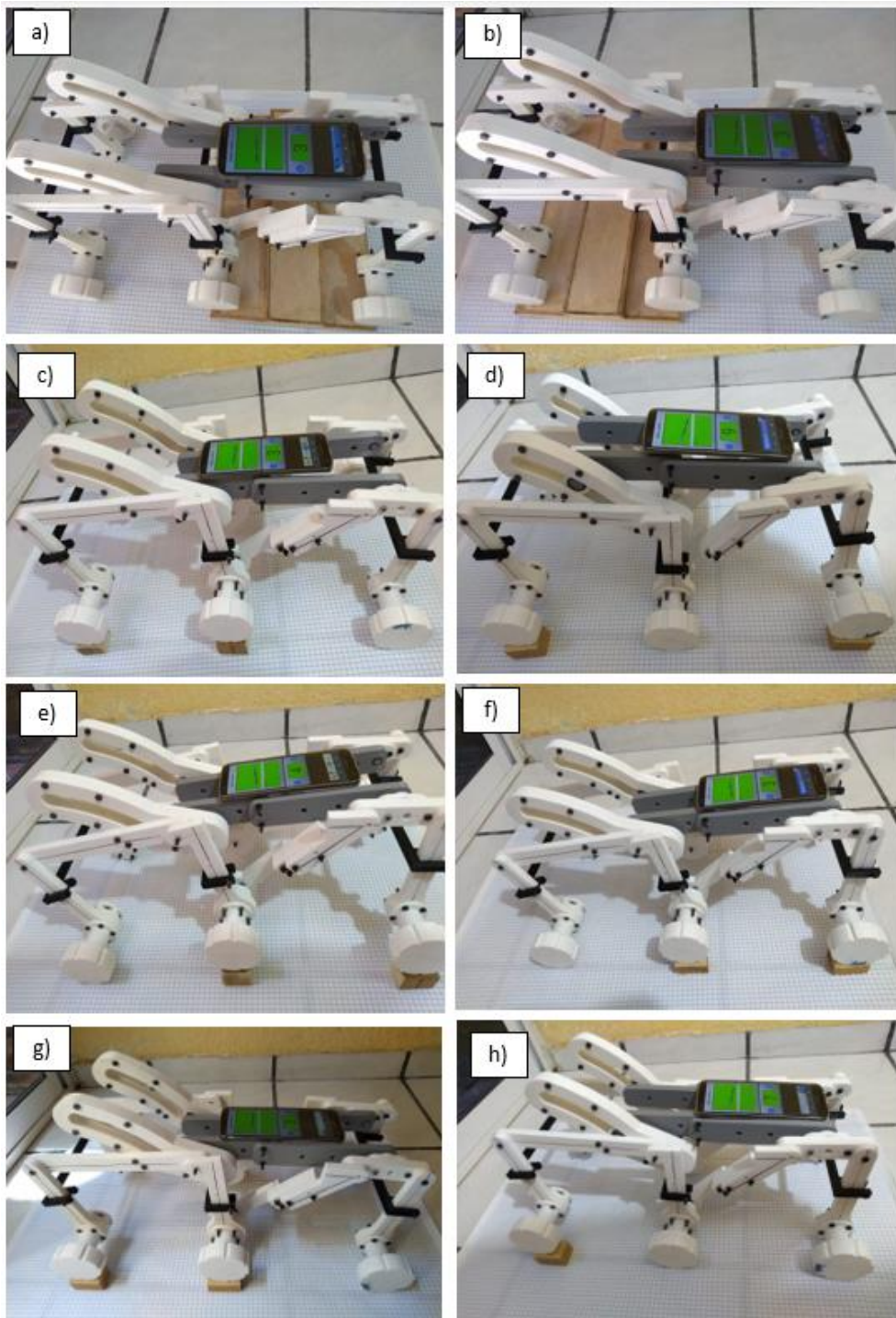


Figura 5.14. Pruebas experimentales. a) Llantas frontal y central sobre escalones. b) Llantas central y trasera sobre escalones. c) Llanta frontal dentro del bache. d) Llanta central dentro del bache. e) Llanta trasera dentro del bache. f) Llantas frontal y central sobre rampa. g) Llanta frontal sobre nivel del suelo h) Llanta trasera sobre rampa.

5.5. Discusión de resultados de prueba experimental sobre terreno de pruebas

Los ángulos medidos de la prueba experimental y su comparación contra los ángulos obtenidos en la simulación se presentan en la Tabla 5.3, donde la primera columna de izquierda a derecha hace referencia a la posición del robot de acuerdo a la Figura 5.14, la segunda columna indica el valor de inclinación de la plataforma de carga medida usando el método 4, la tercera columna indica el ángulo de inclinación obtenido en la plataforma de carga usando el software *SolidWorks*®, la cuarta columna llamada “Delta medición” es la diferencia entre la columna 2 y la columna 3.

Tabla 5.3. Ángulos obtenidos en terreno completo.

Figura	AngleMeter-PROPlus (°)	Solidworks® (°)	Delta medición (°)
a	3	2.94	0.06
b	3	3.08	0.08
c	3	3.66	0.66
d	9	7.07	1.93
e	4	3.60	0.40
f	3	3.27	0.27
g	3	3.02	0.02
h	7	6.24	0.76

De los resultados obtenidos por la prueba experimental se puede observar que la diferencia entre los resultados de la simulación y los medidos experimentales tienen diferencias de decimas entre ambas a excepción de la figura d. La figura d tiene una diferencia de casi dos grados, siendo la mayor diferencia con respecto a la simulación. La mayoría de los resultados demuestran que la suspensión se comporta como indica la simulación lo que comprueba su comportamiento cinemático y su desempeño frente a las suspensiones comparadas en la sección 3.3.

5.6 Suspensión CIEP_1 2020 en terrenos asimétricos

En una aplicación general de un robot móvil los terrenos suelen estar accidentados y sus obstáculos no son conocidos por lo que se tiene que evaluar la capacidad de la suspensión para recorrer terrenos asimétricos. En las pruebas experimentales los obstáculos eran simétricos. En esta sección se discutirá el desempeño de la suspensión CIEP_1 (2020) en un terreno asimétrico.

En las pruebas se encontró que los obstáculos asimétricos afectan a la suspensión de tal forma que reducen su rendimiento y pudieran llegar a bloquear el mecanismo del eslabón seguidor. El mecanismo se bloquea debido a la conexión entre eslabones, es decir que los flancos no son independientes, y si están sujetos a terrenos asimétricos se tienen dificultades para poder tener ángulos diferentes para cada flanco. La línea de conexión que siguen los eslabones se muestra en la Figura 5.15 y la Figura 5.16. En la Figura 5.15 se puede ver que el eslabón (Viga #2) que conecta la llanta frontal con la central también conecta el

eslabón seguidor. El eslabón identificado como Viga #2 conecta por medio de una junta rotativa al eslabón seguidor (plataforma de carga). El eslabón seguidor de un flanco es conectado mediante la plataforma de carga al otro flanco Figura 5.16. Todo esto da como resultado el acoplamiento de ambos flancos en sus movimientos.

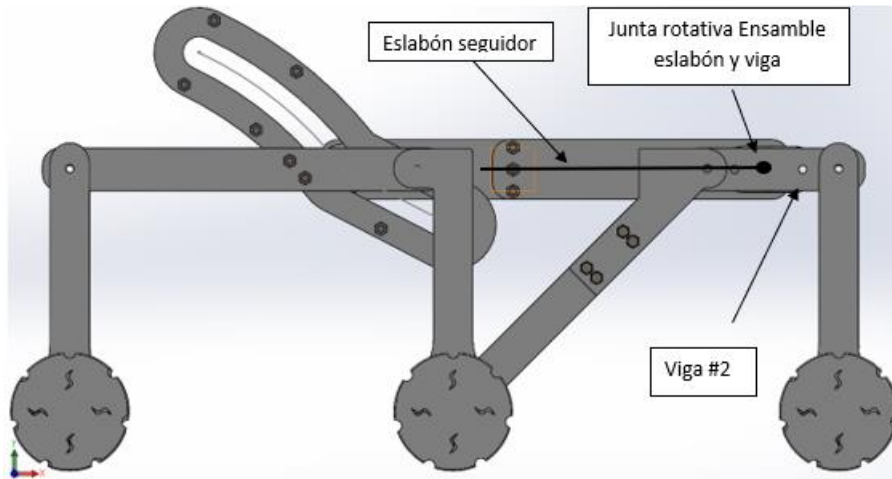


Figura 5.15. Vista frontal suspensión (Conexiones entre componentes).

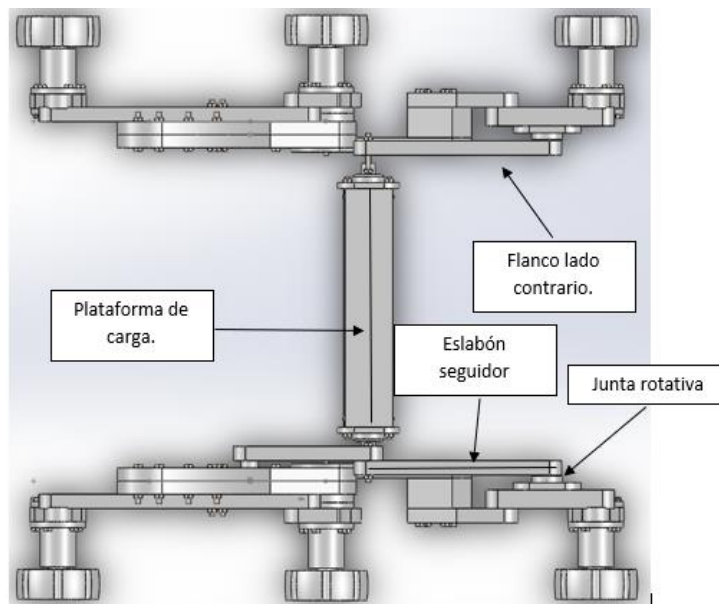


Figura 5.16. Vista superior suspensión (Conexiones entre componentes).

Suponiendo que la suspensión se encuentra con un obstáculo asimétrico como se muestra en la Figura 5.17. La llanta que está sobre el obstáculo se eleva por lo que el eslabón seguidor intentará subir. La llanta que no está sobre el eslabón se resistirá al movimiento transmitido por la plataforma de carga, lo que podría llegar a bloquear la suspensión. La

llanta que no está en contacto con el terreno genera pérdida de tracción sobre el terreno, lo cual ocasiona dificultad para controlar la suspensión. Como se puede apreciar en la Figura 5.18, la llanta que pierde contacto con el terreno puede ser cualquiera de las llantas.

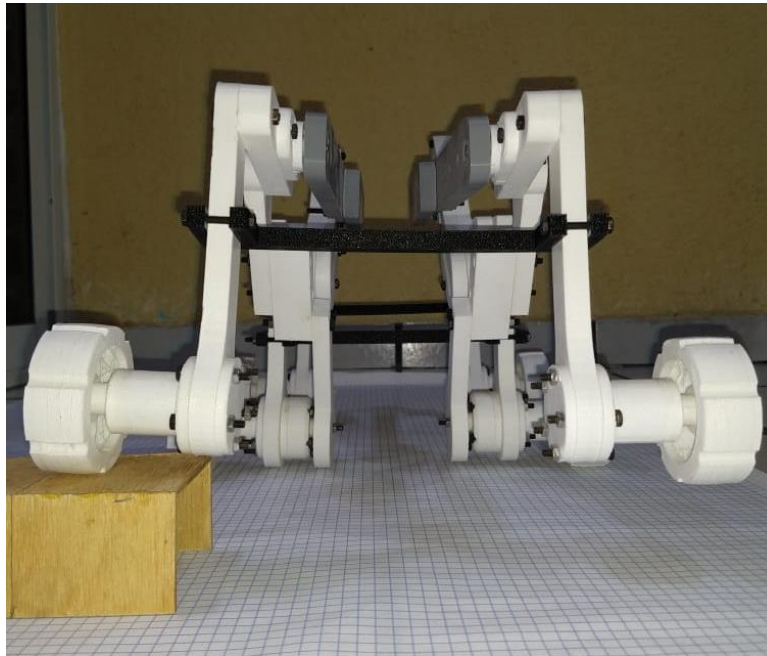


Figura 5.17. Llanta frontal sobre obstáculo asimétrico.

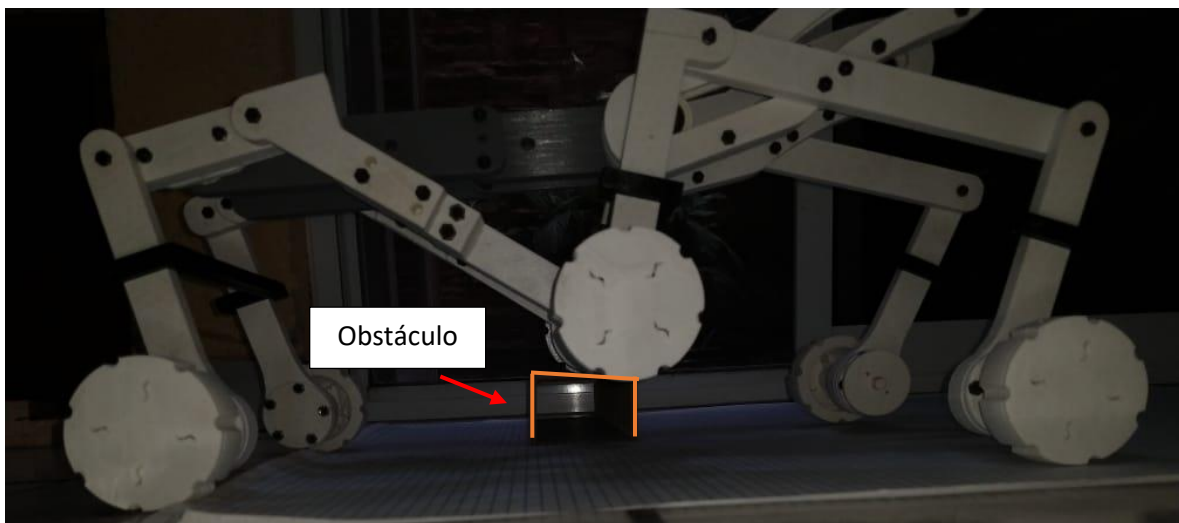


Figura 5.18. Llanta central sobre obstáculo.

A falta de motores se realizaron las pruebas manualmente donde no es fácil observar la dificultad de la suspensión al subir obstáculos asimétricos. Los motores deberán tener mayor torque ya que solo una de las ruedas subirá el obstáculo y se tiene que añadir la resistencia del flanco contrario a moverse.

5.7. Simulaciones en terrenos asimétricos

El desempeño de un robot móvil en un terreno simétrico se mide en función del grado de libertad de su plataforma de carga al sobrepasar los obstáculos (ver Figura 5.19). En un terreno asimétrico la plataforma de carga debe tener dos grados de libertad para que no se bloquee el mecanismo de la plataforma de carga.

Un robot móvil en el caso más general ocupa tres ángulos independientes para poder establecer su orientación los cuales pueden ser representados por los ángulos de Euler. Los ángulos de Euler sirven para especificar la orientación de un sistema móvil con respecto a un sistema coordinado de referencia fijo. En aeronáutica se utilizan ángulos de navegación conocidos como *Roll Pitch* y *Yaw*. Los ángulos de navegación son ángulos de Euler que rotan respectivamente en los ejes “ZYX”. La diferencia entre los ángulos de Euler y los ángulos de navegación es que en el primer caso la rotación se repite en uno de los ejes, mientras que en el segundo la rotación es en ejes diferentes. Los ejes de rotación de una aeronave son conocidos como cabeceo (*Pitch*), guiñada (*Yaw*) y alabeo (*Roll*) y se muestran en la Figura 5.20. Los ángulos de rotación se denominan θ (*pitch*), ψ (*yaw*), Φ (*roll*) y son ángulos de rotación respecto al eje “z” “y” y “x” respectivamente.

Para un robot móvil que atraviesa un terreno asimétrico puede conocerse su orientación mediante los ángulos de navegación. En esta sección se simulan tres robots móviles presentados en la literatura especializada y simulados previamente en la sección 2 (en un terreno simétrico). La simulación es realizada en el software *Matlab®* y se obtienen los ángulos de navegación de la plataforma de carga de la suspensión. Los ángulos de interés para evaluar la suspensión son los ángulos *Pitch* y *Roll*. Las simulaciones se realizarán a tres diferentes suspensiones las cuales son:

- *Three Bogie*
- *Rocker bogie*
- *Parallel bogie*

La primera simulación que se realizó fue para la suspensión *Three Bogie* (Figura 5.21). La configuración *Three Bogie* y sus características cinemáticas se reportaron en la sección 3.1. Las siguientes suspensiones por simular son las suspensiones *Parallel Bogie* y *Rocker Bogie*, también presentadas en la sección 3.1.

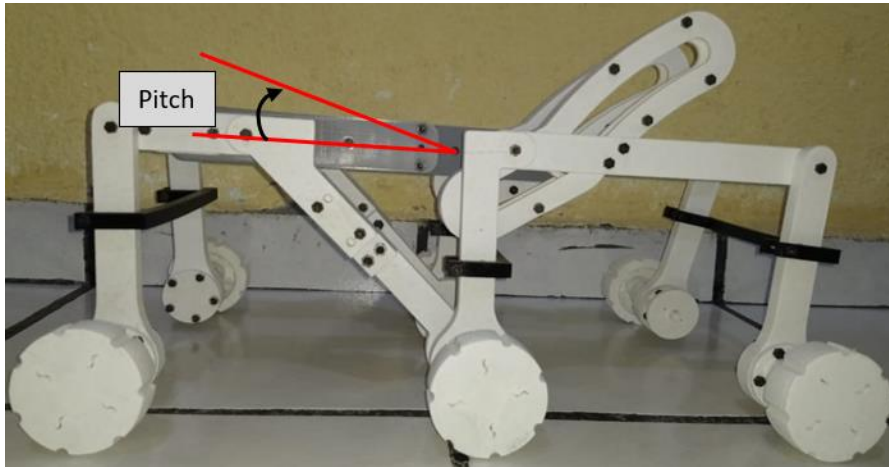


Figura 5.19. Grado de libertad presentado en terrenos simétricos.

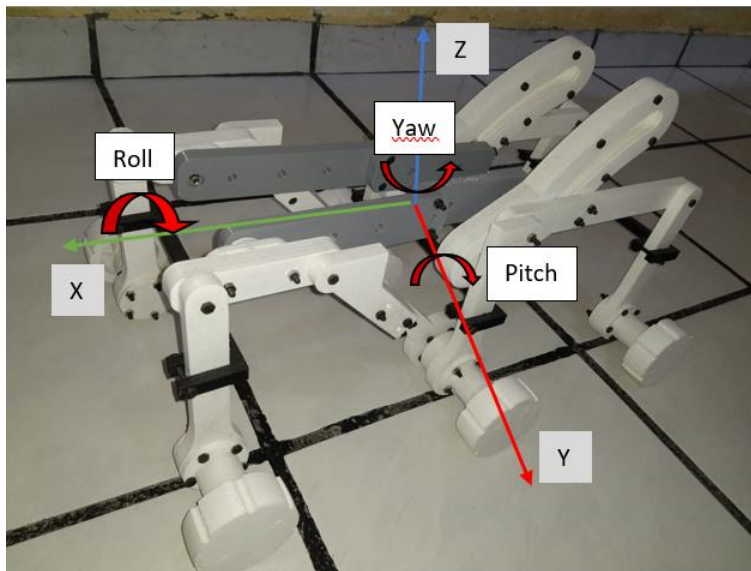


Figura 5.20. Ángulos de navegación en suspensión.

Para obtener los ángulos de navegación se hicieron mediciones con respecto a un marco de referencia fija colocado en el terreno de pruebas, ver Figura 5.21. Un sistema de referencia móvil se coloca sobre la plataforma de carga como se muestra en la Figura 5.22. Debido al tiempo de simulación sólo se coloca un obstáculo en la pista de pruebas, las tres llantas pasan por el obstáculo. El obstáculo tiene una altura de $\frac{3}{4}$ del diámetro de las llantas. En la simulación se obtienen las matrices de transformación de la plataforma de carga con respecto al sistema fijo de esta manera se pueden obtener los ángulos de Euler.

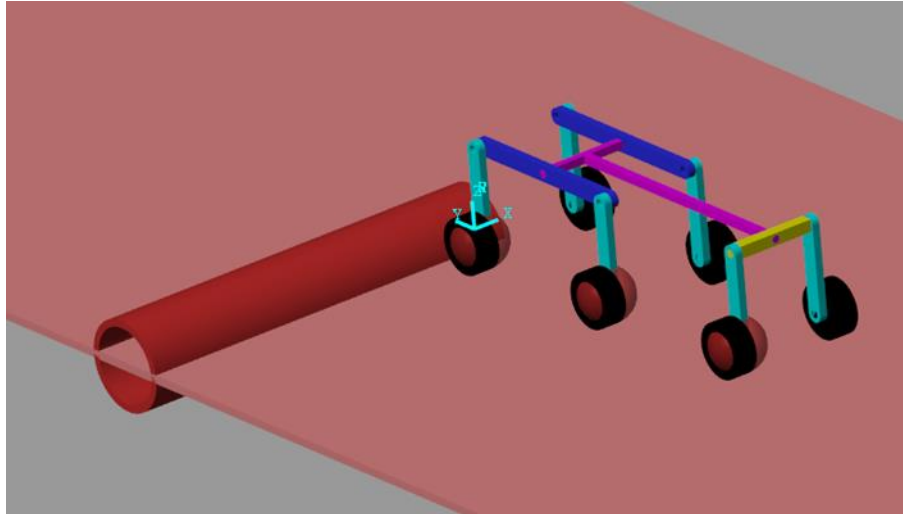


Figura 5.21. Sistema Coordinado de referencia fijo.

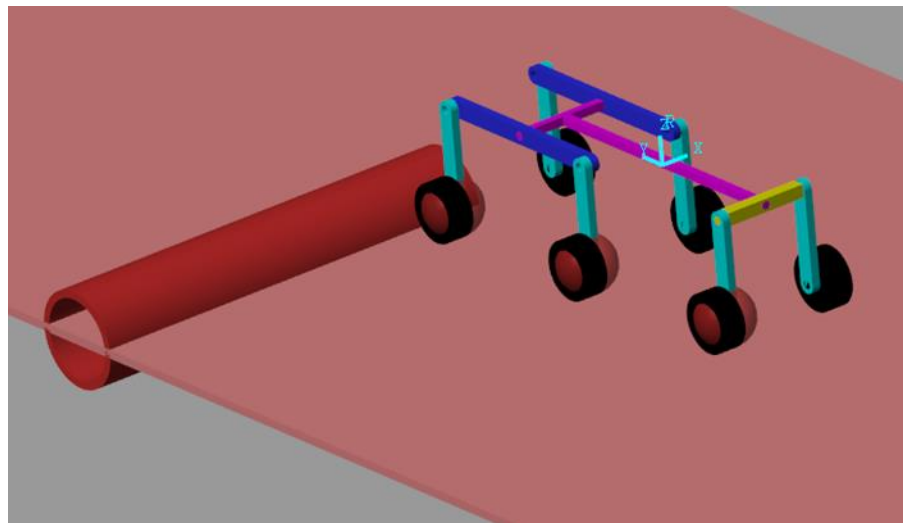


Figura 5.22. Sistema Coordinado de referencia móvil.

5.7.1. Análisis de suspensión *Three Bogie*

En la Figura 5.23 se muestran seis gráficas, cada una es respecto a los ángulos θ , ψ , Φ contra el tiempo y la distancia recorrida de la simulación. Donde los ángulos de inclinación de interés son los ángulos θ , Φ , ángulos *pitch* y *roll* respectivamente. El ángulo *yaw* se presenta debido a que las llantas tienen la misma velocidad por lo que mientras un flanco sube un obstáculo las llantas del otro flanco siguen moviéndose a velocidad continua lo que genera que se desvíe el robot móvil y gire con respecto al eje “z”.

Como se puede observar para el ángulo *pitch* Figura 5.23 b) se observan ángulos de 8.5 grados para las llantas frontal y central mientras que la llanta trasera no influye en este ángulo de navegación. Sin embargo, para el ángulo *roll* (Figura 5.23 c)) para las llantas frontal y central se observan ángulos de 1.6 grados y un ángulo de 2.5 grados para la llanta trasera. El ángulo *yaw* se observa que incrementa cuando la llanta trasera sube el obstáculo. La desviación provocada por el ángulo *yaw* puede ser corregida controlando las llantas, sin

embargo, para los efectos de esta tesis no es de relevancia. Se presenta en la Tabla 5.4 la comparativa de ángulos con respecto a un terreno simétrico.

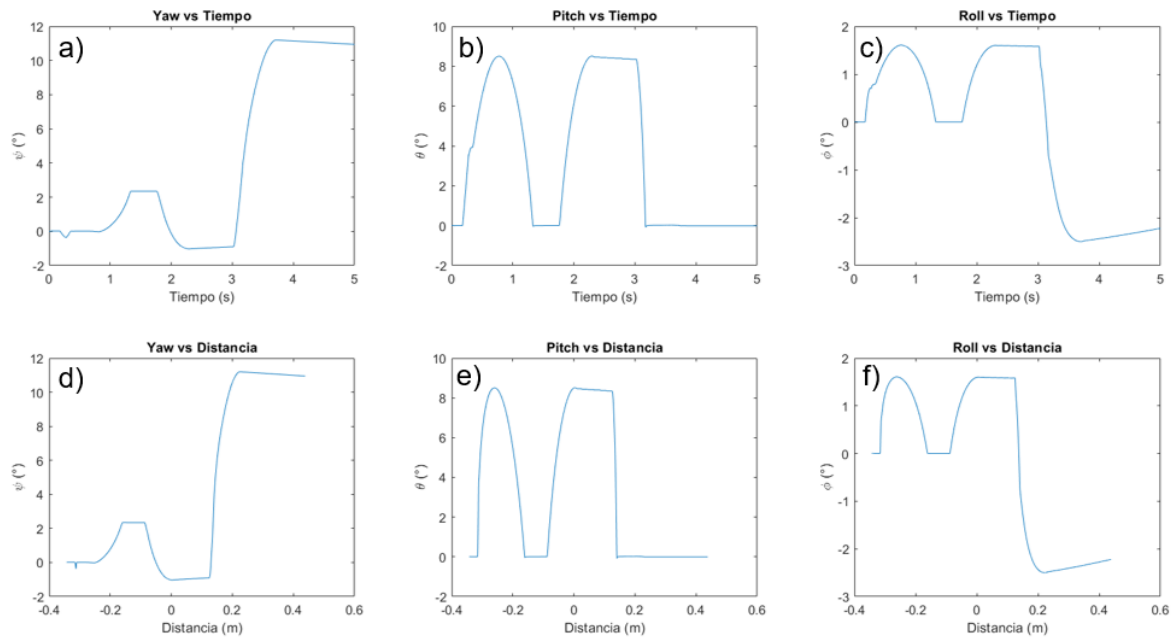


Figura 5.23. Ángulos de navegación para suspensión *Three Bogie*: a) Yaw vs tiempo, b) Pitch vs tiempo, c) Roll vs tiempo, d) Yaw vs distancia, e) Pitch vs distancia, f) Roll vs distancia.

Tabla 5.4. Comparación de ángulos de inclinación en terrenos simétricos y asimétricos de la suspensión *Three Bogie*.

Llanta sobre obstáculo	Terreno simétrico	Terreno asimétrico
	Ángulo pitch (°)	Ángulo pitch (°)
Llanta frontal	7.4	8.5
Llanta central	3.9	8.5
Llanta trasera	8.4	0

Se muestra en la Tabla 5.4 la comparación del ángulo *pitch* de la suspensión *Three Bogie* atravesando un terreno simétrico y un terreno asimétrico. Como se observa en la Tabla 5.4 los ángulos *Pitch* de un terreno asimétrico son mayores. La diferencia con respecto al terreno simétrico la llanta trasera no afecta el *Pitch* de la suspensión gracias a su junta rotativa en la parte trasera de la plataforma de carga.

5.7.2. Análisis de suspensión *Rocker-Bogie*

La siguiente suspensión por simular es la llamada *Rocker-Bogie*, se atraviesa el mismo terreno de pruebas y el mismo obstáculo que la suspensión *Three Bogie*. Las gráficas obtenidas para esta suspensión se muestran en la Figura 5.24. Se puede observar que para esta suspensión el ángulo *Roll* es despreciable y el ángulo *Pitch* es el que alcanza el mayor valor de los tres ángulos. Se presenta en la Tabla 5.5 la comparación de los valores del ángulo *pitch* para un terreno simétrico y un terreno asimétrico.

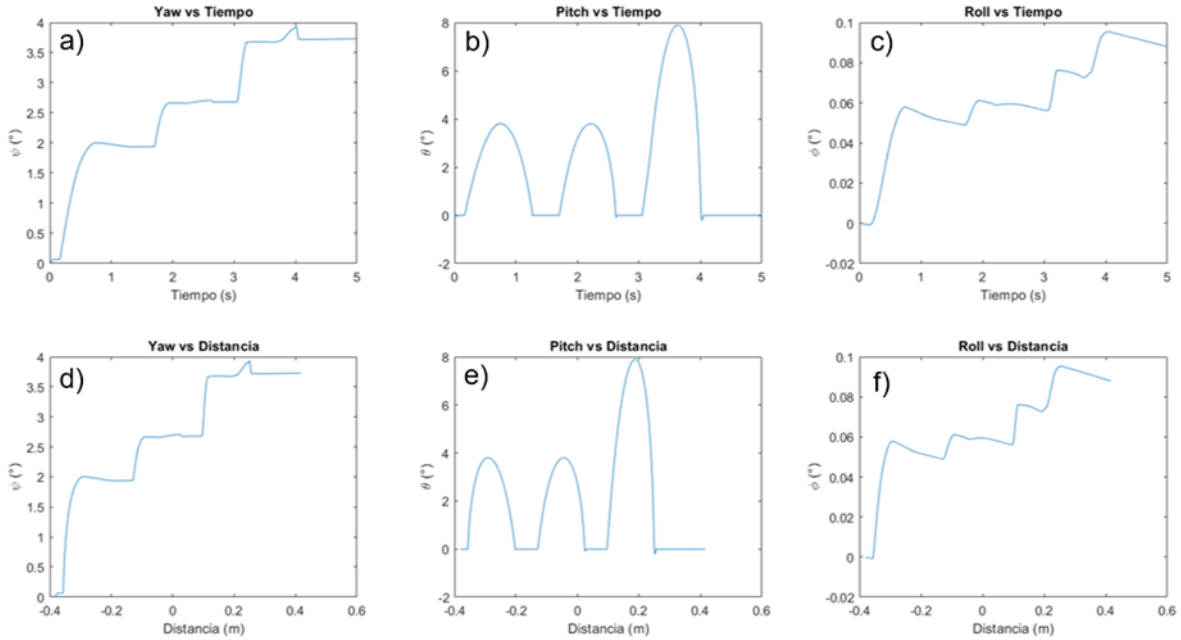


Figura 5.24. Ángulos de navegación para suspensión Rocker-Bogie: a) Yaw vs tiempo, b) Pitch vs tiempo, c) Roll vs tiempo, d) Yaw vs distancia, e) Pitch vs distancia, f) Roll vs distancia.

Tabla 5.5. Comparación de ángulos de inclinación en terrenos simétricos y asimétricos de la suspensión Rocker-Bogie.

Llanta sobre obstáculo	Terreno simétrico	Terreno asimétrico
	Ángulo pitch (°)	Ángulo pitch (°)
Llanta frontal	4.15	3.6
Llanta central	4.13	3.7
Llanta trasera	8.6	7.8

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 5.24 y en la Tabla 5.5 el ángulo *pitch* es cercano al del terreno simétrico y el ángulo *Roll* es despreciable considerando su magnitud. El ángulo *Yaw* al igual que la simulación anterior se hace presente debido a la velocidad constante de las seis ruedas. Se observó que para ésta configuración el desempeño es igual al de un terreno simétrico considerando que solo existe un obstáculo y las ruedas suben una a la vez.

5.7.3. Análisis de suspensión *Parallel Bogie*

La última suspensión por simular es la llamada *Parallel Bogie*. Se muestra en la Figura 5.25 las gráficas de sus ángulos de navegación durante la simulación. Se puede observar el ángulo *Roll* incrementa conforme cada llanta atraviesa el obstáculo. El ángulo *Roll* se incrementa conforme cada llanta atraviesa el obstáculo esto es debido a que el mecanismo de cuatro barras se atora con cada llanta que sobrepasa el obstáculo. La llanta trasera es la que más deforma el mecanismo de cuatro barras y es donde se encuentra el ángulo *Roll* de mayor magnitud. El ángulo *pitch* se mantiene cuando la llanta trasera pasa sobre el obstáculo, debido a la deformación del mecanismo de cuatro barras. Se muestra en la Tabla 5.6 los ángulos presentados en un terreno simétrico y un terreno asimétrico para su comparación.

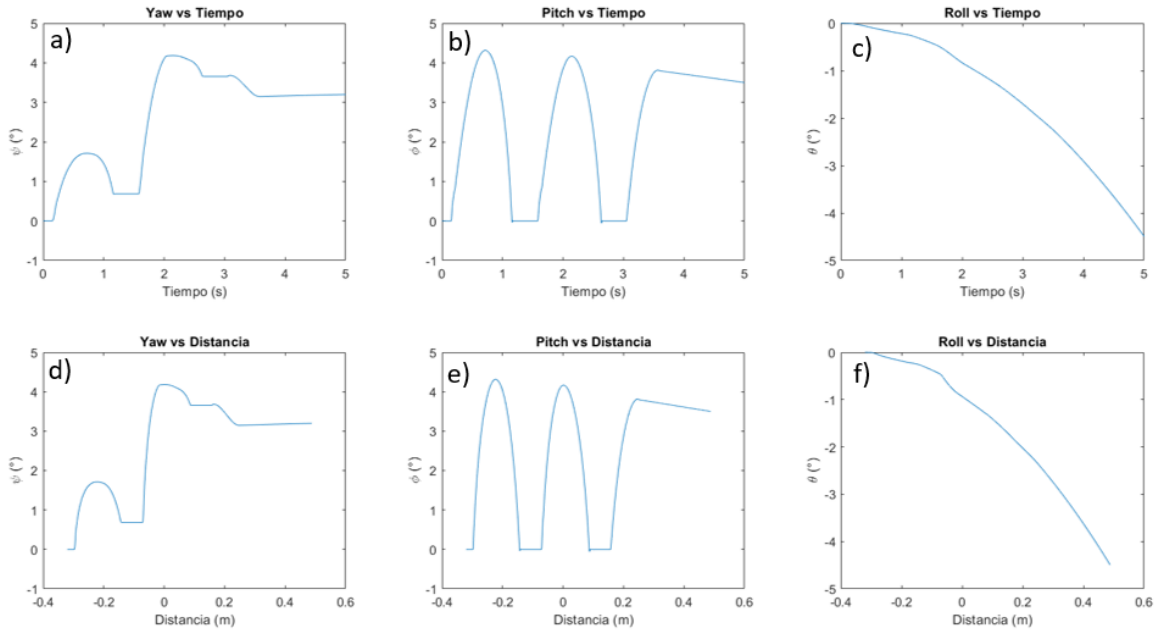


Figura 5.25. Ángulos de navegación para suspensión Parallel Bogie: a) Yaw vs tiempo, b) Pitch vs tiempo, c) Roll vs tiempo, d) Yaw vs distancia, e) Pitch vs distancia, f) Roll vs distancia.

Tabla 5.6. Comparación de ángulos de inclinación en terrenos simétricos y asimétricos de la suspensión Parallel Bogie.

Llanta sobre obstáculo	Terreno simétrico	Terreno asimétrico
	Ángulo pitch (°)	Ángulo pitch (°)
Llanta frontal	4.3	4.3
Llanta central	4.3	4.3
Llanta trasera	8.7	3.7

Se puede observar que el comportamiento de la plataforma de carga para un terreno asimétrico es similar para ésta configuración, sin embargo, la llanta trasera genera un ángulo de inclinación menor. El ángulo de la llanta trasera es menor debido a que se compensa la inclinación por la junta rotativa de la plataforma de carga, mientras un flanco está fijo, el flanco que sobrepasa el obstáculo gira alrededor de la plataforma de carga.

5.8. Discusión de resultados de las tres diferentes suspensiones en terrenos asimétricos

Como se puede observar de las tablas presentadas, la suspensión *Rocker-Bogie* es la que demuestra el mismo comportamiento al recorrer un terreno simétrico ya que el ángulo *Roll* es despreciable. Para la suspensión *Three Bogie* los ángulos *pitch* para las llantas central y trasera son diferentes comparándolas con un terreno simétrico. El ángulo generado cuando la llanta central y trasera sobrepasan el obstáculo es mayor que en un terreno simétrico. El Ángulo *Roll* alcanza valores de 1.6° por lo que comparando el ángulo *pitch* contra el *roll* se considera despreciable. Para la suspensión *Parallel Bogie* el desempeño es visiblemente mejor para un terreno asimétrico (ángulo *pitch*) ya que los ángulos de la llanta frontal y central son iguales al de un terreno simétrico y el ángulo de la llanta trasera

es menor. El ángulo *Roll* alcanza valores de 5° por lo que si se ve afectada por este ángulo. La suspensión CIEP_1 2020 no fue simulada en un terreno asimétrico ya que su desempeño fue discutido en la sección 5.6 donde se encontró que su desempeño sería el mismo que si atravesara un terreno simétrico la cual es una característica clave de la suspensión CIEP_1 2020.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se ha desarrollado la síntesis de una suspensión pasiva móvil, así como la construcción y evaluación de esta, la cual es capaz de sobrepasar obstáculos con una variación en el ángulo de inclinación de su plataforma de carga dentro de un rango de 0° a 15° . Para lograr lo anterior se reprodujo el análisis cinemático de la suspensión y la síntesis de un mecanismo deslizador acoplado a la estructura de la suspensión, el cual es capaz de compensar el ángulo de la plataforma de carga. El desarrollo del análisis cinemático y su síntesis fue un trabajo original desarrollado por el autor de este estudio ya que fue necesario satisfacer nuevos requerimientos de diseño producto del cambio de dimensiones, y de esta forma producir un prototipo que fuera factible de ser fabricado mediante manufactura aditiva.

En el análisis realizado para la síntesis del mecanismo deslizador, se consideraron 6 casos de obstáculos para los cuales la suspensión debería ser capaz de sobrepasar manteniendo el ángulo de inclinación de la plataforma a un valor mínimo, es decir cuando cada llanta sube o baja un obstáculo la plataforma de carga se mantiene horizontal. Para ello se utilizaron casos de estudio, de los cuales se obtuvo una trayectoria que la plataforma de carga debía seguir para mantener la horizontalidad de ésta. Las trayectorias se seleccionaron por conveniencia para evitar bloquear el mecanismo deslizador, es decir, se seleccionó usando dos casos que no tuvieran cambios abruptos en la combinación de ambas trayectorias.

Se realizó una comparación contra suspensiones reportadas en la literatura bajo las mismas condiciones y se reportaron los resultados de dicha comparación. La suspensión CIEP_1 2020 tiene la característica de sintetizar un dispositivo deslizador que compense la horizontalidad de la plataforma de carga de acuerdo con los obstáculos a sobrepasar. Si previamente se conoce el terreno de pruebas que la suspensión recorrerá es posible sintetizar un mecanismo que sea el óptimo para dicho terreno.

Así, la capacidad de la suspensión para mantener una plataforma estable usando un mecanismo pasivo es exitoso para los casos sintetizados en el dispositivo deslizador. Si el terreno de pruebas es diferente al utilizado en este trabajo de tesis el desempeño de la suspensión cambiará. Si el terreno de pruebas tiene obstáculos asimétricos, la suspensión mostrará un comportamiento similar a un terreno simétrico debido al diseño de la suspensión donde su mecanismo actuará como si ambas llantas estuvieran sobre el obstáculo.

Se fabricó el prototipo de la suspensión utilizando manufactura aditiva y considerando las dimensiones analizadas para la síntesis del mecanismo deslizador. Se ensambló el prototipo tomando ventaja de las características que ofrece la manufactura aditiva, como es: a) la creación de piezas complejas, b) menor tiempo de construcción de piezas en comparativa con procesos convencionales, c) bajo costo para la construcción de las piezas y d) rediseño rápido de piezas no funcionales o piezas que fallaron. El prototipo presentado tiene rigidez y capacidad de carga inferiores a el prototipo anterior que fue construido en aluminio. El prototipo construido en material PLA valida las simulaciones y la síntesis cinemática por lo que ahora se puede fabricar fácilmente en metal aumentando su rigidez debido a que ya fue corroborado su funcionamiento.

En las pruebas experimentales se encontró que las trayectorias utilizadas cumplen el objetivo para el cual fueron sintetizadas (el ángulo de inclinación es cercano 0 cuando las llantas frontal y central suben un obstáculo). El ángulo de inclinación de 14° se presenta para la rueda que no fue considerada en la trayectoria del eslabón seguidor. Si se considerara la trayectoria de la llanta trasera el ángulo sería menor. La suspensión cumple con las especificaciones requeridas del diseño: sobrepasar obstáculos mayores a $\frac{3}{4}$ del diámetro de sus llantas, ser completamente pasiva y mantener la plataforma horizontal en los casos sintetizados para el mecanismo deslizador.

Como trabajo a futuro queda considerar el diseño de una suspensión capaz de sobrepasar terrenos asimétricos, ya que en el diseño actual ambos flancos de la suspensión son dependientes, es decir lo que pasa en un flanco se refleja en el otro, por lo que el sobrepasar un obstáculo asimétrico haría perder el contacto con el suelo del lado sin obstáculo. Asimismo queda la automatización de la suspensión instalando cámaras, realizar un modelo dinámico, implementar control por visión y el desarrollo e integración de un brazo manipulador de dos grados de libertad con el fin de que el posgrado cuente con un robot móvil para entornos no estructurados.

Referencias

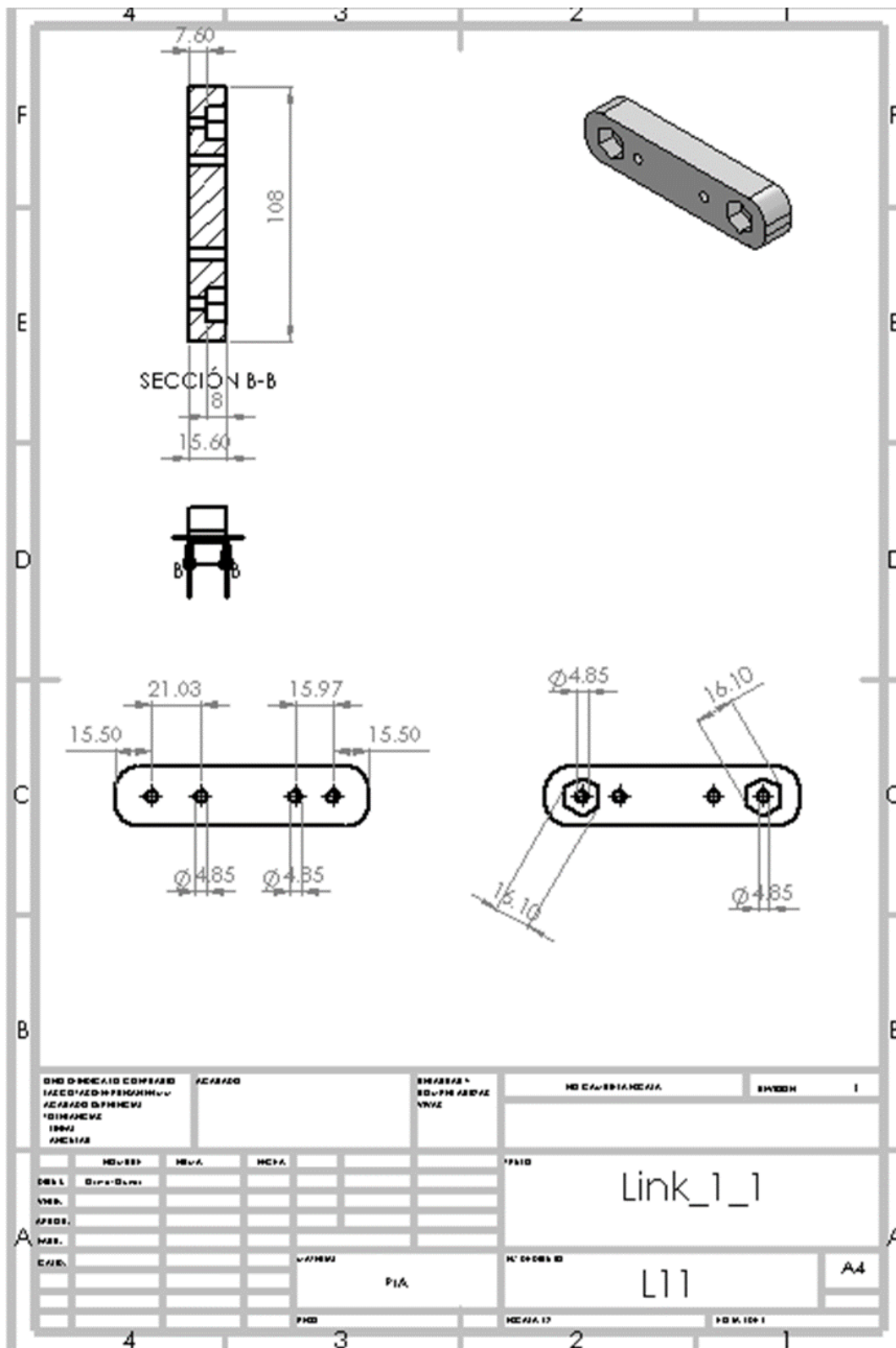
- [1] D. Choi, Y. Kim, S. Jung, H. S. Kim, and J. Kim, "R-Mo: A new mobile robotic platform to reduce variations in height and pitch angle on rugged terrain," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 4343–4348.
- [2] S. Roh *et al.*, "Flexible suspension mechanism for stable driving of a differential drive mobile robot," in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 5518–5523.
- [3] S. Nakajima, "Concept of a novel four-wheel-type mobile robot for rough terrain, RT-mover," *2009 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS 2009*, pp. 3257–3264, 2009.
- [4] D. Wettergreen and T. Barfoot, *Field and Service Robotics: Results of the 10th International Conference*, vol. 113. 2016.
- [5] Sungchul Kang *et al.*, "ROBHAZ-DT2: design and integration of passive double tracked mobile manipulator system for explosive ordnance disposal," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, 2003, vol. 3, pp. 2624–2629 vol.3.
- [6] T. Kot, J. Bajak, and P. Novák, "Analysis and prevention of selected risks of remotely and autonomously controlled mobile robot TeleRescuer," in *2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2017, pp. 551–554.
- [7] R. Volpe, J. Balaram, T. Ohm, and R. Ivlev, "The Rocky 7 Mars rover prototype," *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS '96*, vol. 3, pp. 1558–1564, 1996.
- [8] S. Gokul, R. Dhikshith, S. A. Sundaresh, and M. Gopinath, "Gesture Controlled Wireless Agricultural Weeding Robot," *2019 5th Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Syst.*, pp. 926–929, 2019.
- [9] M. Ahmadi and P. Stone, "A Multi-Robot System for Continuous Area Sweeping Tasks," *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2006. ICRA 2006.*, no. May, pp. 1724–1729, 2006.
- [10] L. S. R. Mechsy, M. U. B. Dias, W. Pragithmukar, and A. L. Kulasekera, "A Mobile Robot Based Watering System for Smart Lawn Maintenance," no. Iccas, pp. 1537–1542, 2017.
- [11] V. Medina, A. Cardenas, and H. Medellín-Castillo, "Kinematical Design and Simulation of a Mobile Robot With Adaptable Suspension," in *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011*, 2011, vol. 7.
- [12] R. Gallegos Cerda, K. Quiroga García, D. Rodríguez Moncada and A. Ojeda Ramírez, *Introducción a la Robótica*, 1st ed. 2019, pp. 45-47.
- [13] R. Siegwart, P. Lamon, T. Estier, M. Lauria, and R. Piguet, "Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 40, no. 2, pp. 151–162, 2002.
- [14] R. González, F. Rodríguez, and J. L. Guzmán, "Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 12, no. 1, pp. 3–12, 2015.
- [15] B. Chen, R. Wang, Y. Jia, L. Guo, and L. Yang, "Design of a high performance suspension for lunar rover based on evolution," *Acta Astronaut.*, vol. 64, no. 9, pp. 925–934, 2009.

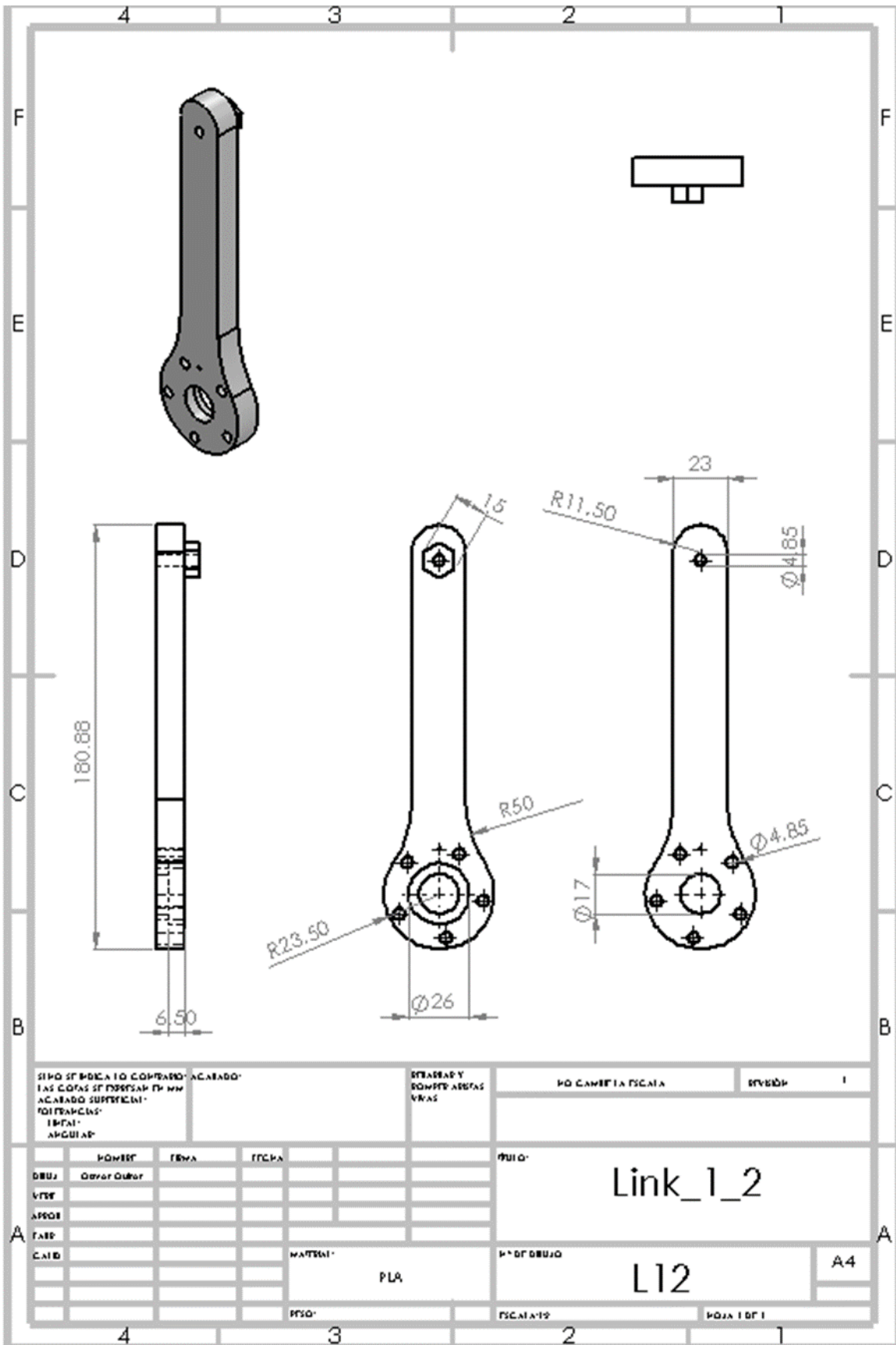
- [16] R. Siegwart, "Mobile Robots Facing the Real World," in *Field and Service Robotics: Recent Advances in Reserch and Applications*, S. Yuta, H. Asama, E. Prassler, T. Tsubouchi, and S. Thrun, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 21–30.
- [17] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Bradford Book, 2004.
- [18] G. Campion and W. Chung, "Wheeled Robots," in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 391–410.
- [19] P. Tomaszuk, A. Łukowska, M. Rećko, K. Dzierżek, and P. Straszynski, "Active wheel speed control to avoid lifting the swingarms in rocker-bogie suspension," in *2019 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, 2019, pp. 36–39.
- [20] D. Michel and K. Mclsaac, "New rocker-bogie and terramechanics-based wheel/soil interaction models for planetary rovers," *2012 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2012*, pp. 2417–2422, 2012.
- [21] D. Choi, J. R. Kim, S. Cho, S. Jung, and J. Kim, "Rocker-Pillar : Design of the rough terrain mobile robot platform with caterpillar tracks and rocker bogie mechanism," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 3405–3410, 2012.
- [22] Z. Luo, J. Shang, G. Wei, and L. Ren, "A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage," *Mech. Mach. Theory*, vol. 128, pp. 16–32, 2018.
- [23] R. Siegwart, P. Lamon, T. Estier, M. Lauria, and R. Piguat, "Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 40, no. 2, pp. 151–162, 2002.
- [24] M. Lauria, Y. Piguat, and R. Siegwart, *Octopus - An Autonomous Wheeled Climbing Robot*. 2002.
- [25] Y. Mori, K. Watanabe, and I. Nagai, "Development of an omnidirectional mobile platform with a rocker-bogie suspension system," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 6134–6139.
- [26] H. S. Sucuoglu, I. Bogrekci, A. Gultekin, and P. Demircioglu, "Design, Analysis and Development of Mobile Robot with Flip-Flop Motion Ability," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 30, pp. 436–440, 2018.
- [27] D. Choi, J. Oh, and J. Kim, "Analysis method of climbing stairs with the rocker-bogie mechanism," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 9, pp. 2783–2788, 2013.
- [28] T. Thueer and R. Siegwart, "Mobility evaluation of wheeled all-terrain robots," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 58, no. 5, pp. 508–519, 2010.
- [29] J. Matijevic, "Mars Pathfinder Microrover - Implementing A Low Cost Planetary Mission Experiment," *Proc. Second IAA Int. Conf. Low-Cost Planet. Mission.*, vol. 1, pp. 1–30, 1996.
- [30] S. Hayati *et al.*, "The Rocky 7 rover: a Mars sciencecraft prototype," in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 1997, vol. 3, pp. 2458–2464 vol.3.
- [31] H. Hacot, S. Dubowsky, and P. Bidaud, "Analysis and Simulation of a Rocker-Bogie Exploration Rover," *Courses Lect. Cent. Mech. Sci.*, pp. 95–102, 1998.

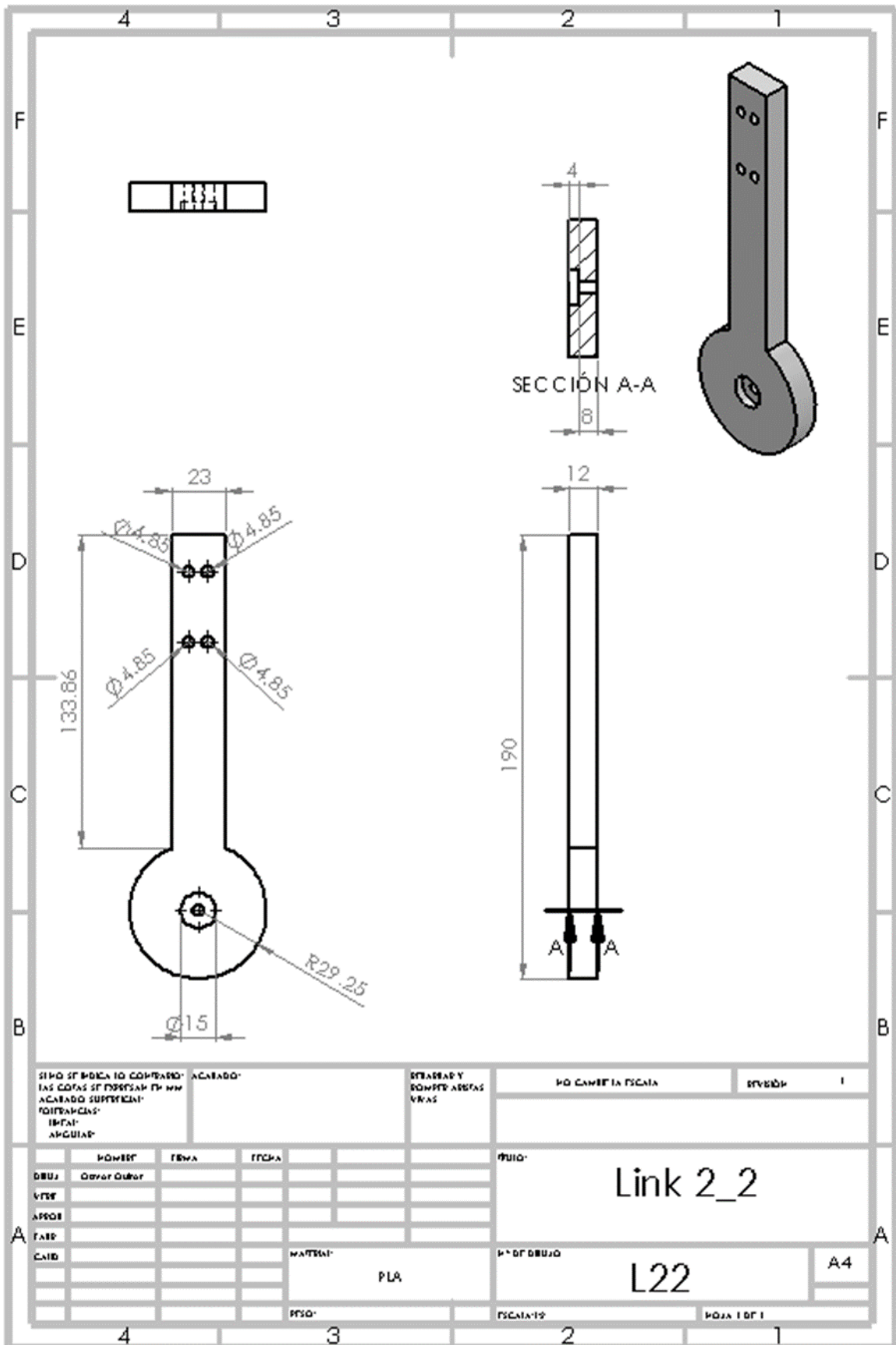
- [32] Y. Wang, X. Yu, and W. Tang, "Analysis of obstacle-climbing capability of planetary exploration rover with rocker-bogie structure," *Proc. - 2009 Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Sci. ITCS 2009*, vol. 1, pp. 329–332, 2009.
- [33] T. Appala and A. Ghosal, "A mobile robot with a two-degree-of-freedom suspension for traversing uneven terrain with minimal slip: Modeling, simulation and experiments," *Mech. Mach. Theory*, vol. 93, pp. 83–97, 2015.
- [34] T. Jianguo, L. Xiong, Y. Fei, and D. Zongquan, "A wheel-arm reconfigurable mobile robot design and its reconfigurable configuration," *Reconfigurable Mech. Robot. 2009. ReMAR 2009. ASME/IFTOMM Int. Conf.*, pp. 550–557, 2009.
- [35] G. G. Ryland and H. H. Cheng, "Design of iMobot, an intelligent reconfigurable mobile robot with novel locomotion," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 60–65.
- [36] H. R. Fernandes and A. P. Garcia, "Design and control of an active suspension system for unmanned agricultural vehicles for field operations," *Biosyst. Eng.*, vol. 174, pp. 107–114, 2018.
- [37] K. Alipour, S. A. A. Moosavian, and Y. Bahramzadeh, "Postural stability evaluation of spatial wheeled mobile robots with flexible suspension over rough terrains," in *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2008, pp. 241–246.
- [38] G. Reina and M. Foglia, "An Adaptive Suspension System for Planetary Rovers," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 43, no. 16, pp. 199–204, 2010.
- [39] M. J. Lawn, "Study of stair-climbing assistive mechanisms for disabled," no. December, pp. 21–34, Chap. 2, 2002.
- [40] T. Thueer, A. Krebs, R. Siegwart, and P. Lamon, "Performance comparison of rough-terrain robots - simulation and hardware.," *J. F. Robot.*, vol. 24, pp. 251–271, Mar. 2007.
- [41] M. Lauria, "TOUT-TERRAIN ROBOTISÉS," vol. 2833, 2003.
- [42] N. Patel, R. Slade, and J. Clemmet, "The ExoMars rover locomotion subsystem," *J. Terramechanics*, vol. 47, no. 4, pp. 227–242, 2010.
- [43] T. Thueer, P. Lamon, A. Krebs, and R. Y. Siegwart, *CRAB - Exploration Rover with Advanced Obstacle Negotiation Capabilities*. Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Autonomous Systems Lab, 2006.
- [44] K. Russell and R. S. Sodhi, "On the design of slider-crank mechanisms. Part II: multi-phase path and function generation," *Mech. Mach. Theory*, vol. 40, no. 3, pp. 301–317, 2005.
- [45] "The quest for Mars," in *Lunar and Planetary Rovers: The Wheels of Apollo and the Quest for Mars*, New York, NY: Springer New York, 2007, pp. 209–252.
- [46] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley (9a. ed.)*. 2012.
- [47] S. Noemi, C. Ávila, H. I. M. Castillo, and D. F. De Lange, "Tema A2 : Materiales y Manufactura Análisis experimental y simulación numérica del desempeño estructural de probetas FDM con diferentes porcentajes de relleno," pp. 121–128, 2017.

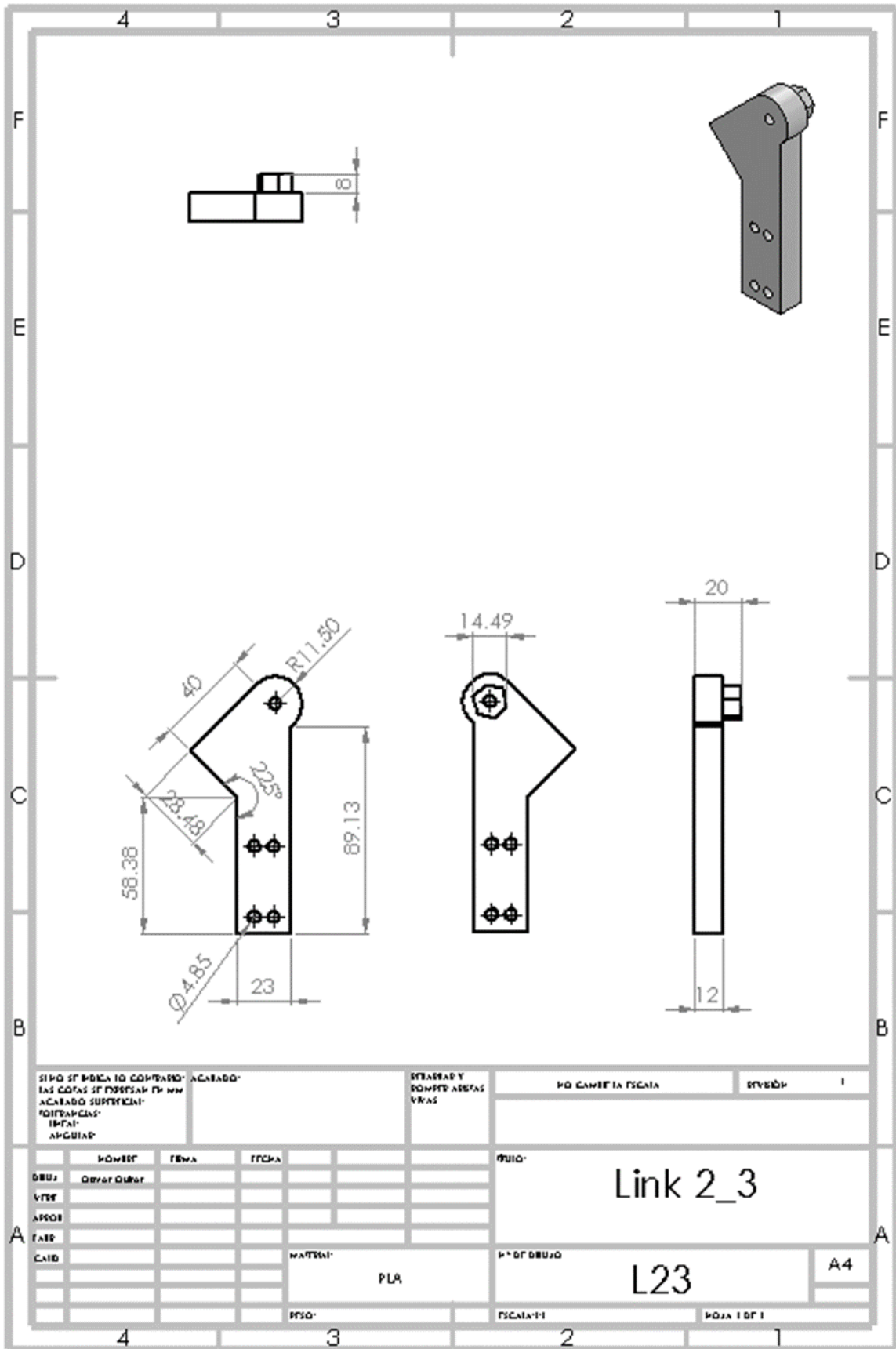
- [48] X. Zhang, L. Chen, T. Mulholland, and T. A. Osswald, "Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper / PLA composite part manufactured by fused deposition modeling," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 6, pp. 1–12, 2019.
- [49] M. Gelinsky, "3D Printing BT - Digital Health: Scaling Healthcare to the World," H. Rivas and K. Wac, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 109–122.

Anexo A1 Planos de construcción









SI NO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO:
 LAS COTAS SE PODRAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 RIGIDEZ
 ANGULAR

ESTADOS Y
 ROMPER LINEAS
 VERAS

NO CAMBIA LA ESCALA

REVISO

1

POWER	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
DRUJ	Ortiz Ortiz			
VISE				
APROB				
FASE				
CAD				

PROJ

Link 2_3

PLA

Nº DE DIBUJO

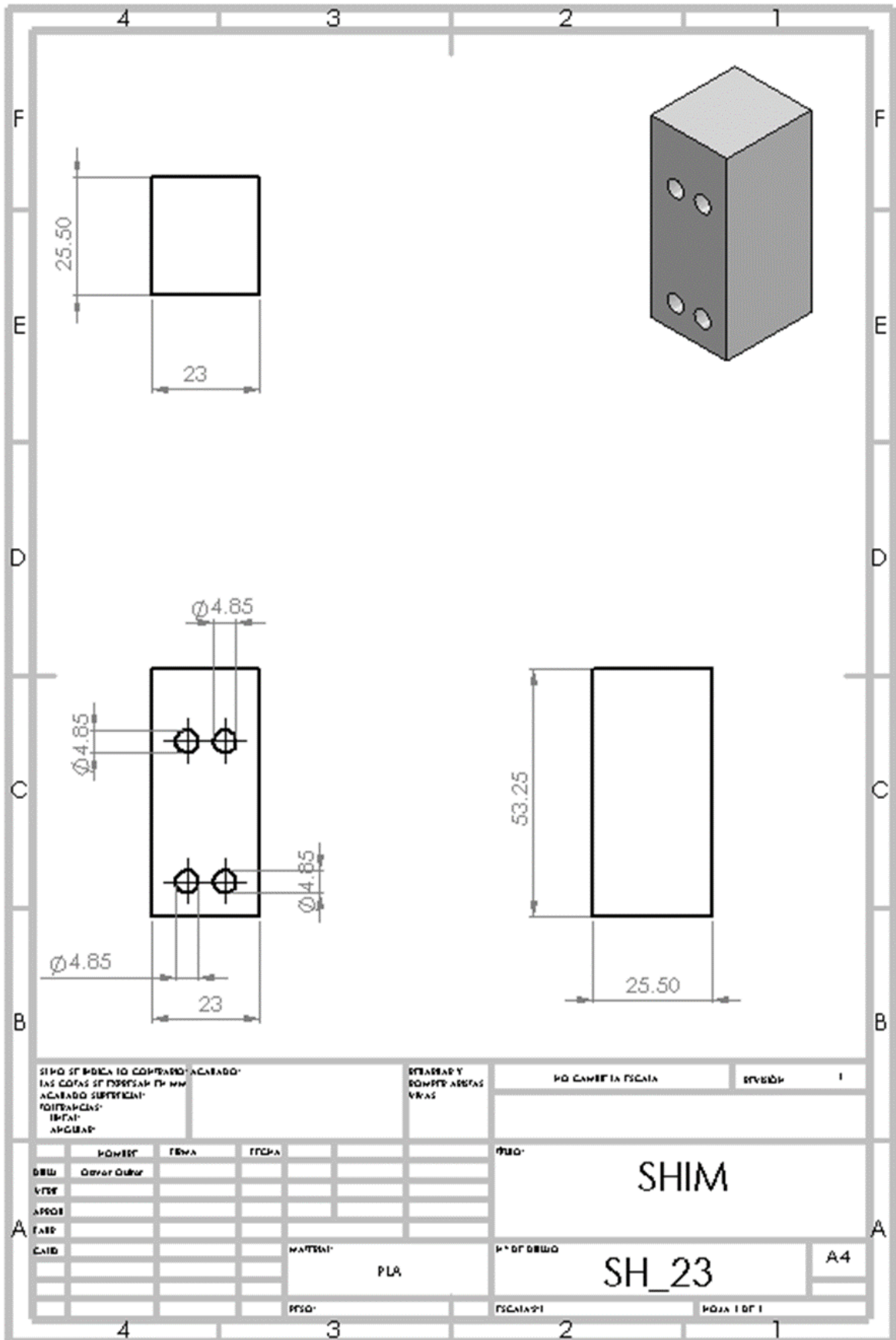
L23

A4

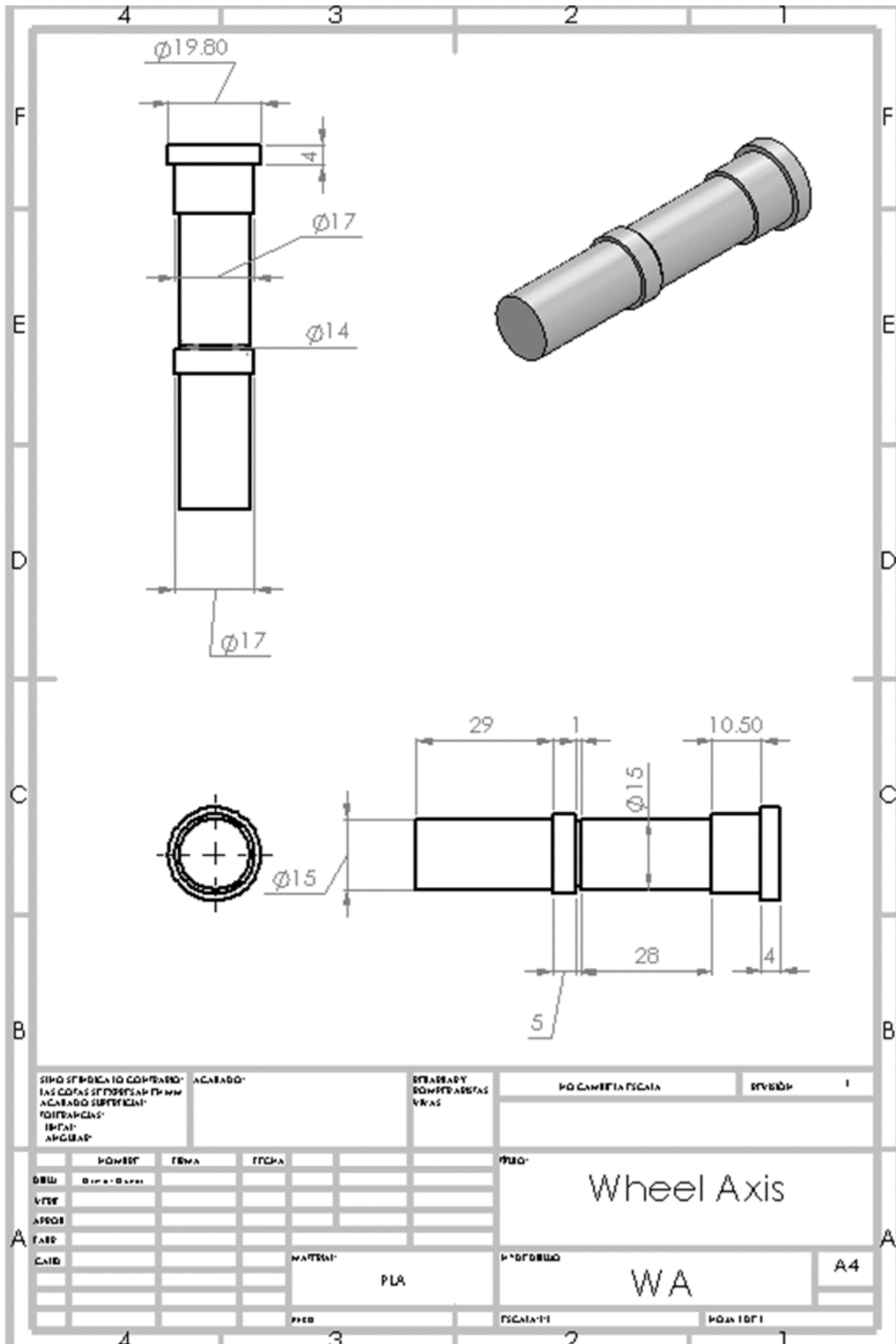
PROJ

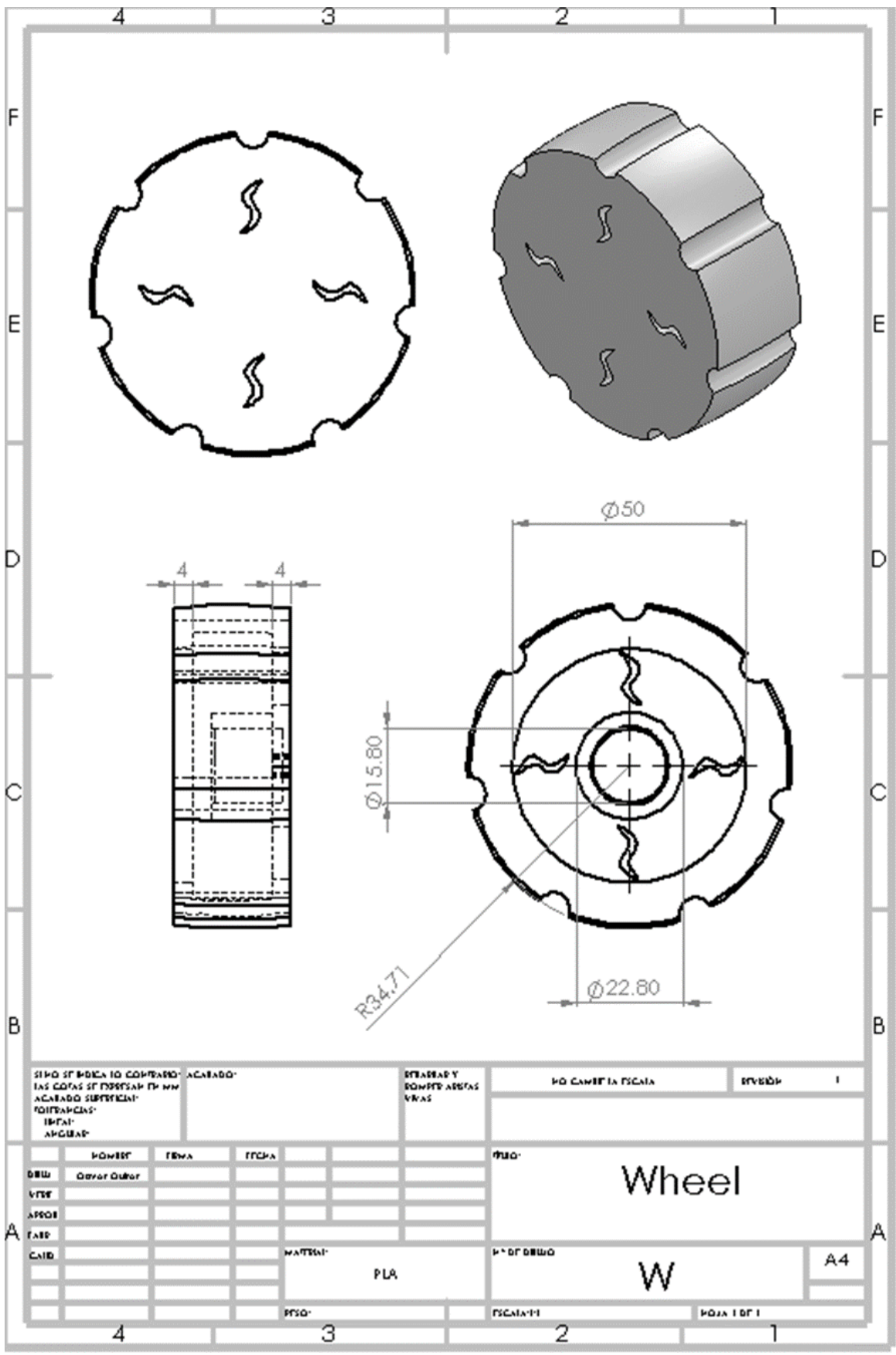
ESCALA: 1:1

PÁGINA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO: LAS CORTAS SE EFECTUARÁN EN 45° ACABADO SUPERFICIAL: TOITERRANCIAS: IMPACTO: ANQUEMAR			ESTADÍSTICO DIMENSIONES VARIAS	NO CAMBIA ESCALA INVERSO	1
NOMBRE DESCR VITR APROB TAMP CALIB	DISEÑO DISEÑO DISEÑO DISEÑO DISEÑO	REVISIÓN REVISIÓN REVISIÓN REVISIÓN REVISIÓN	MATERIAL PLA	N.º DE DIBUJO SH_23	A4
PISO:			ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	





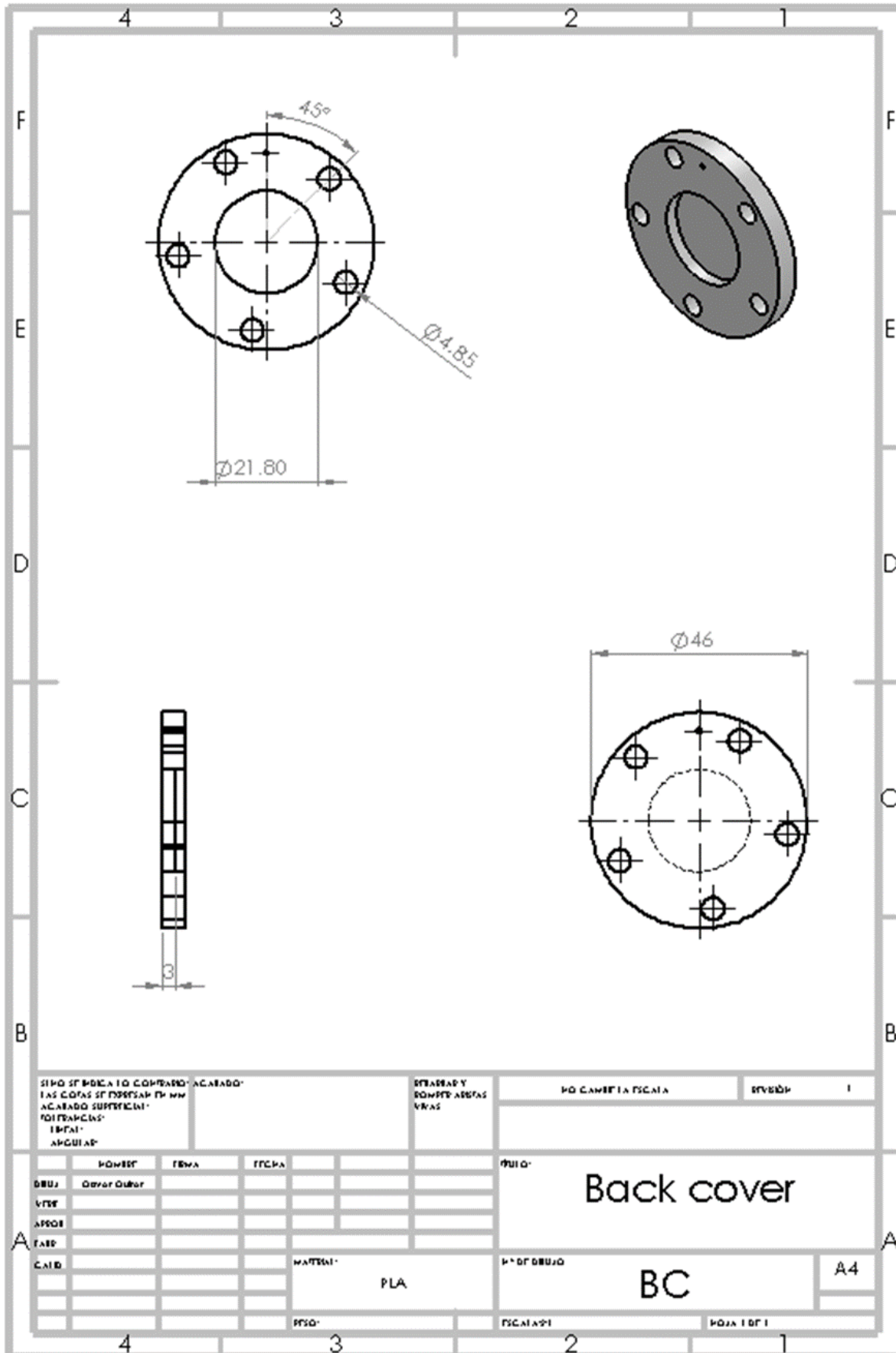
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO:
 LAS CORTES SE EFECTUARÁN EN UN
 ACABADO SUPERFICIAL
 POTENCIALMENTE
 IMPACTO
 ANGULAR

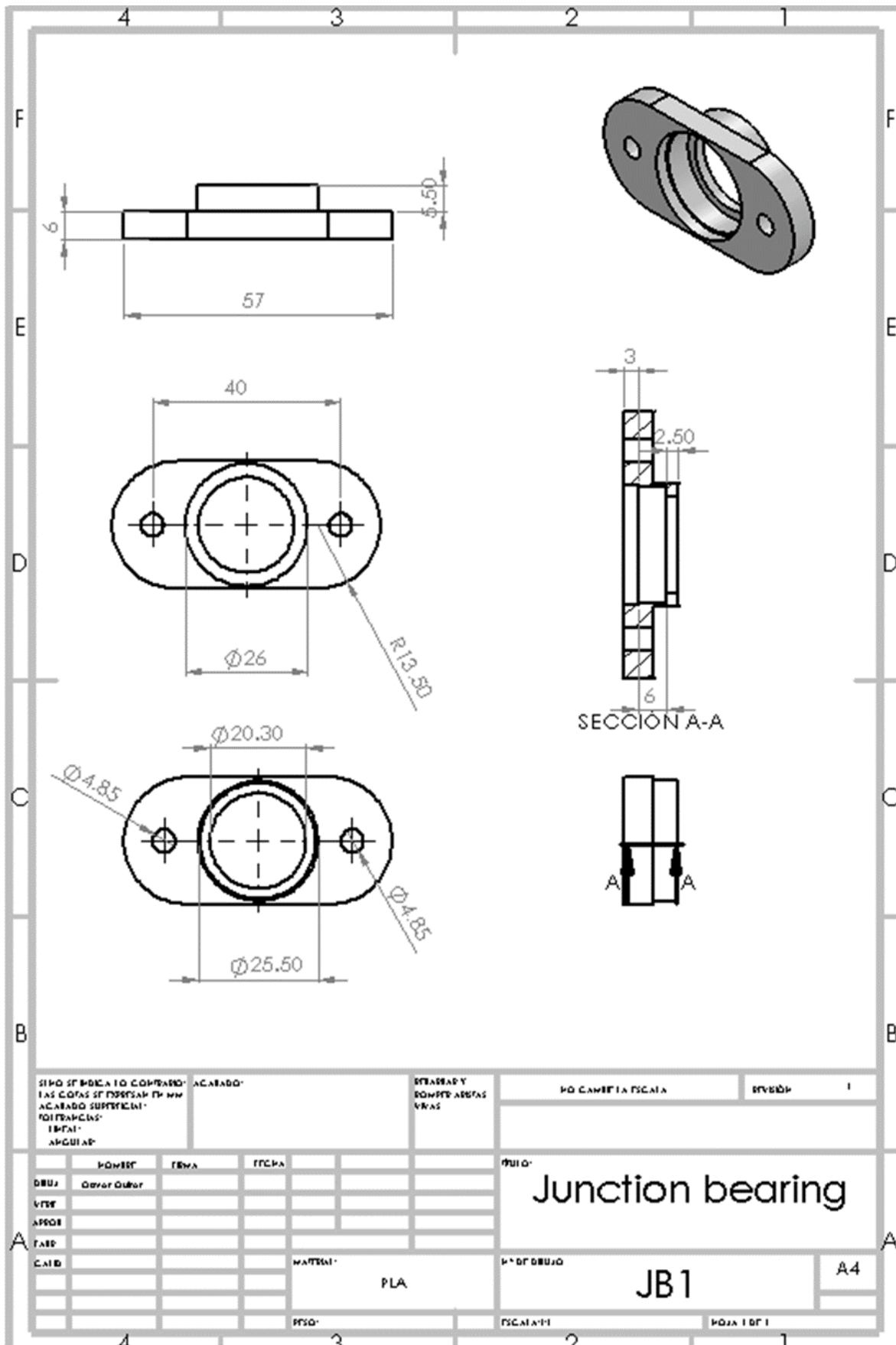
DETALLES Y
 DIMENSIONES
 VARIAS

NO CAMBIE LA ESCALA

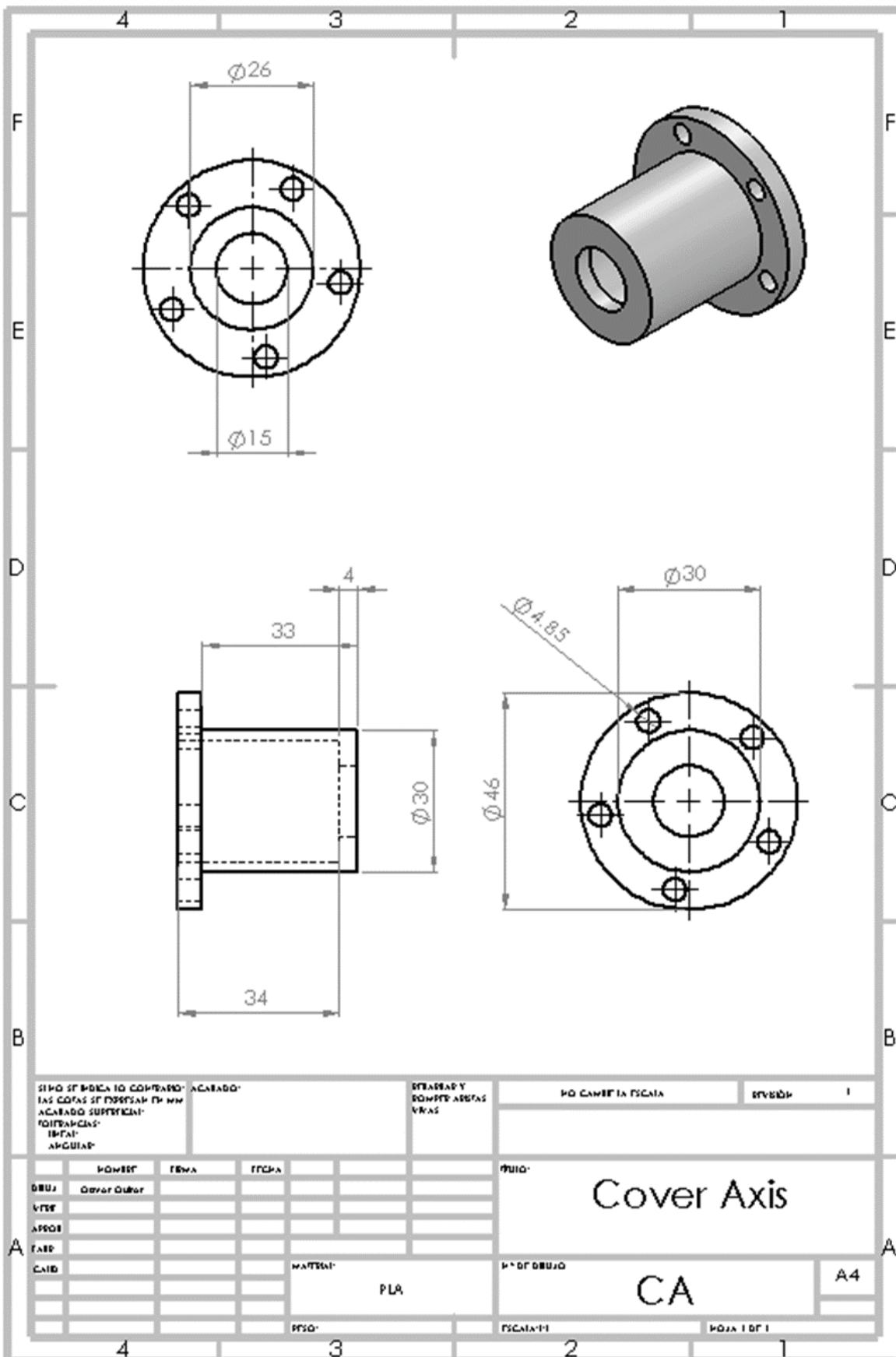
REVISED: 1

	КОНСТ	ГЕНА	ГРНА		ПРО:
ОБЩ	Outer Outer				Wheel
УСТ					
АРОС					
ТАБ					
САД					
			МАТЕРИАЛ	PLA	№ ДГ ОБЩО
			ПРО:		W
			ГЕНАТИ		ПОД 1 ДГ 1
					A4





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: FUEGAS FUEGAS ANGULAR		ACABADO:	ESTADO Y CONDICIONES VARIAS	NO CAMBIA ESCALA	REVISED
PROYECT	REVISOR	ESCALA	PROYECTO	Junction bearing JB1	
DESE	APROB				
VISE					
CAIB		MATERIAL:	Nº DE DIBUJO		
		PLA	JB1		
		PROY:	ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 RUGOSIDADES:
 ISO 131
 ANGULAR

ESTRUCY
 DOWNT ASISTAS
 VIKAS

NO CAMBIA ESCALA

REVISED

1

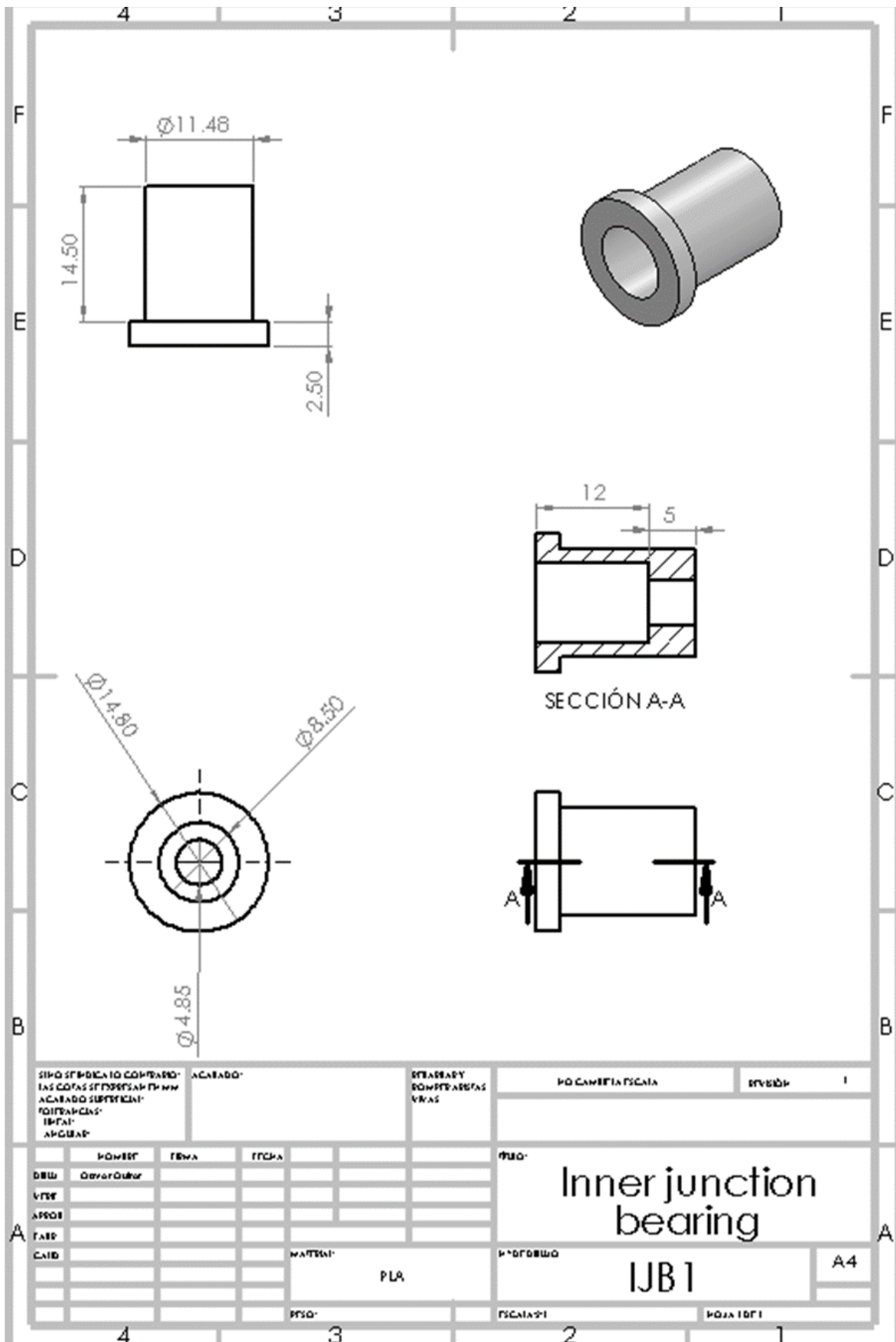
POWER	FEWA	FECHA		
DRU	David Oubor			
VISE				
APSOE				
LABE				
CAIB				

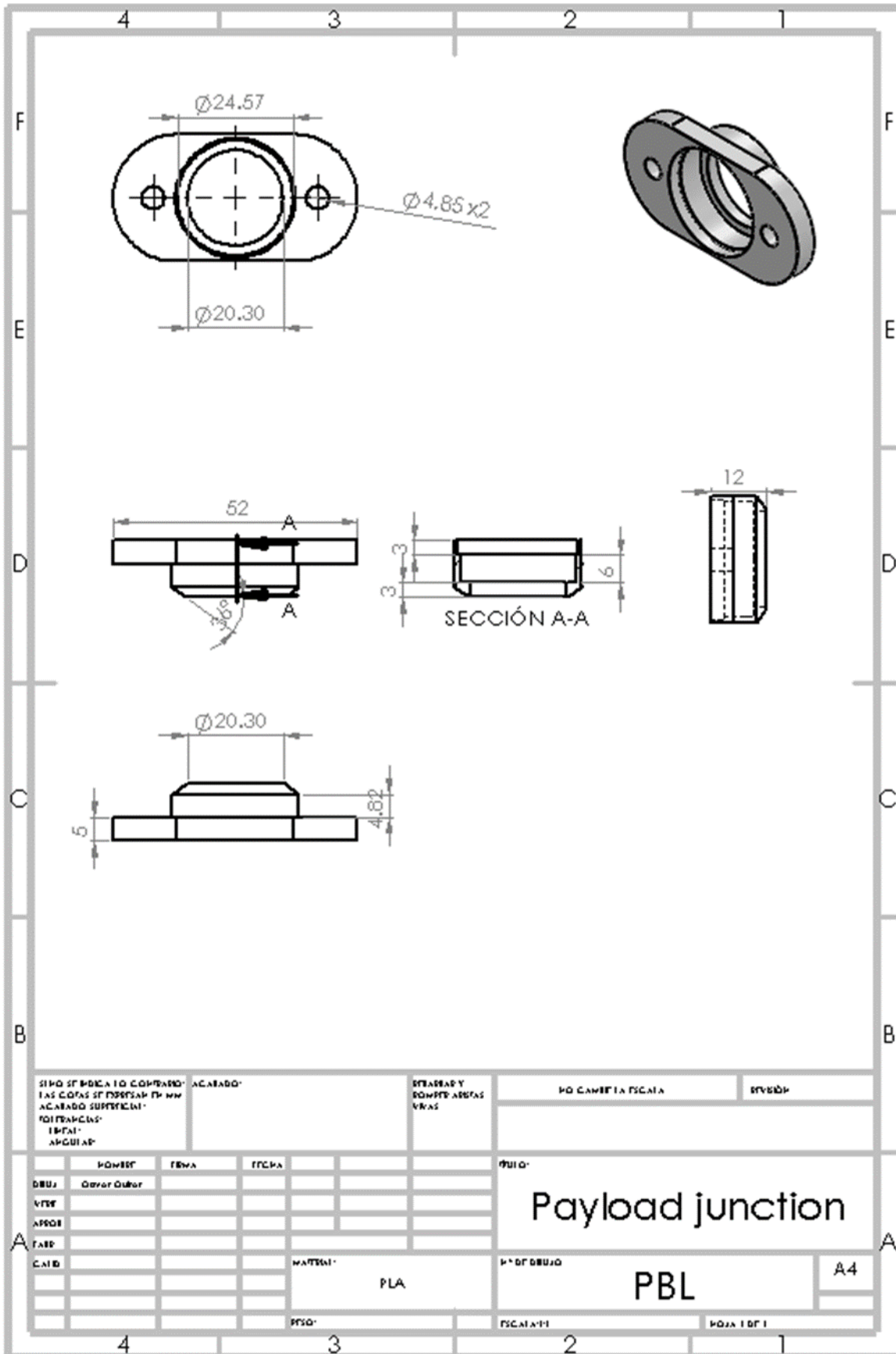
Cover Axis

PLA

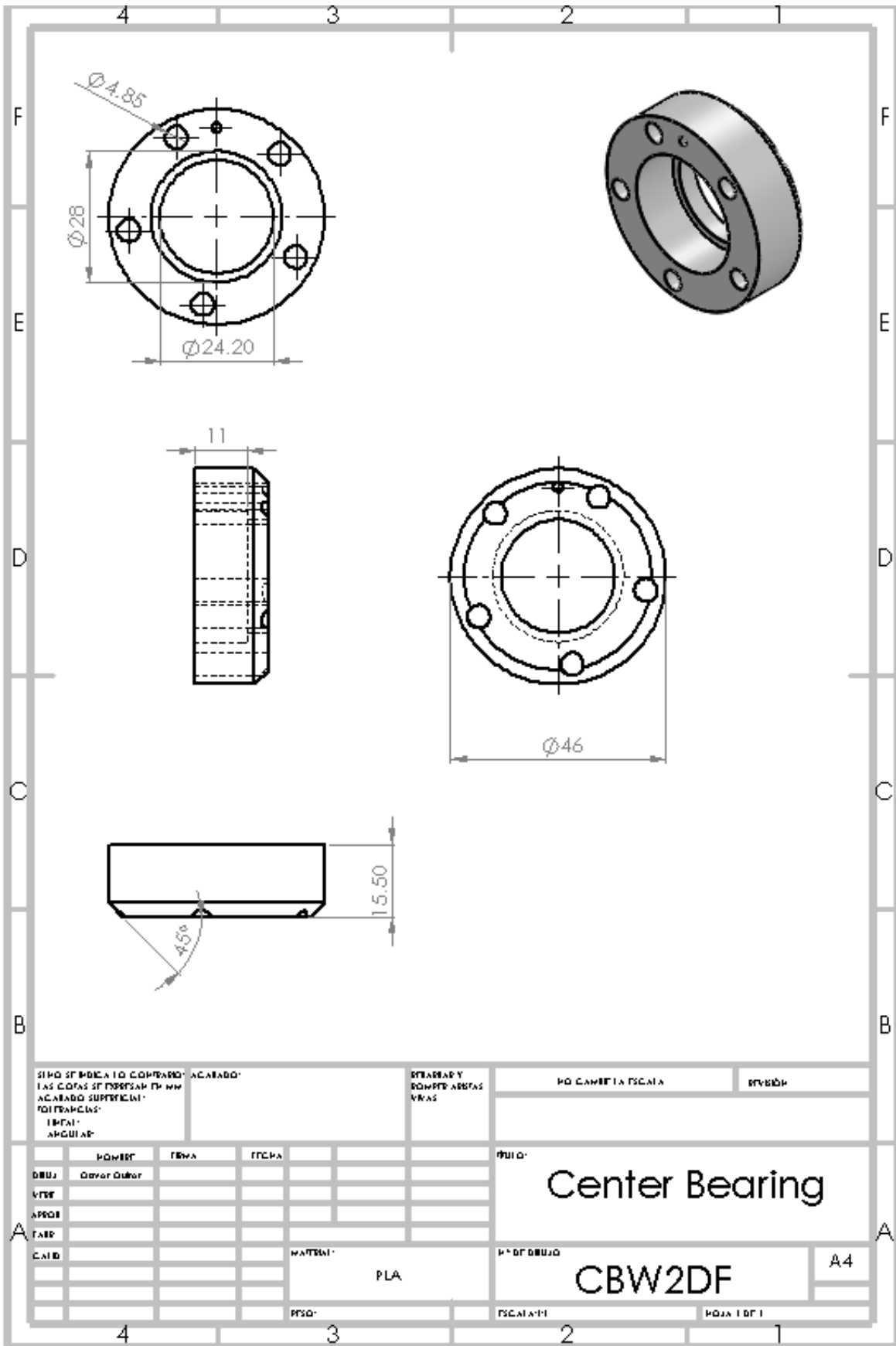
CA

A4

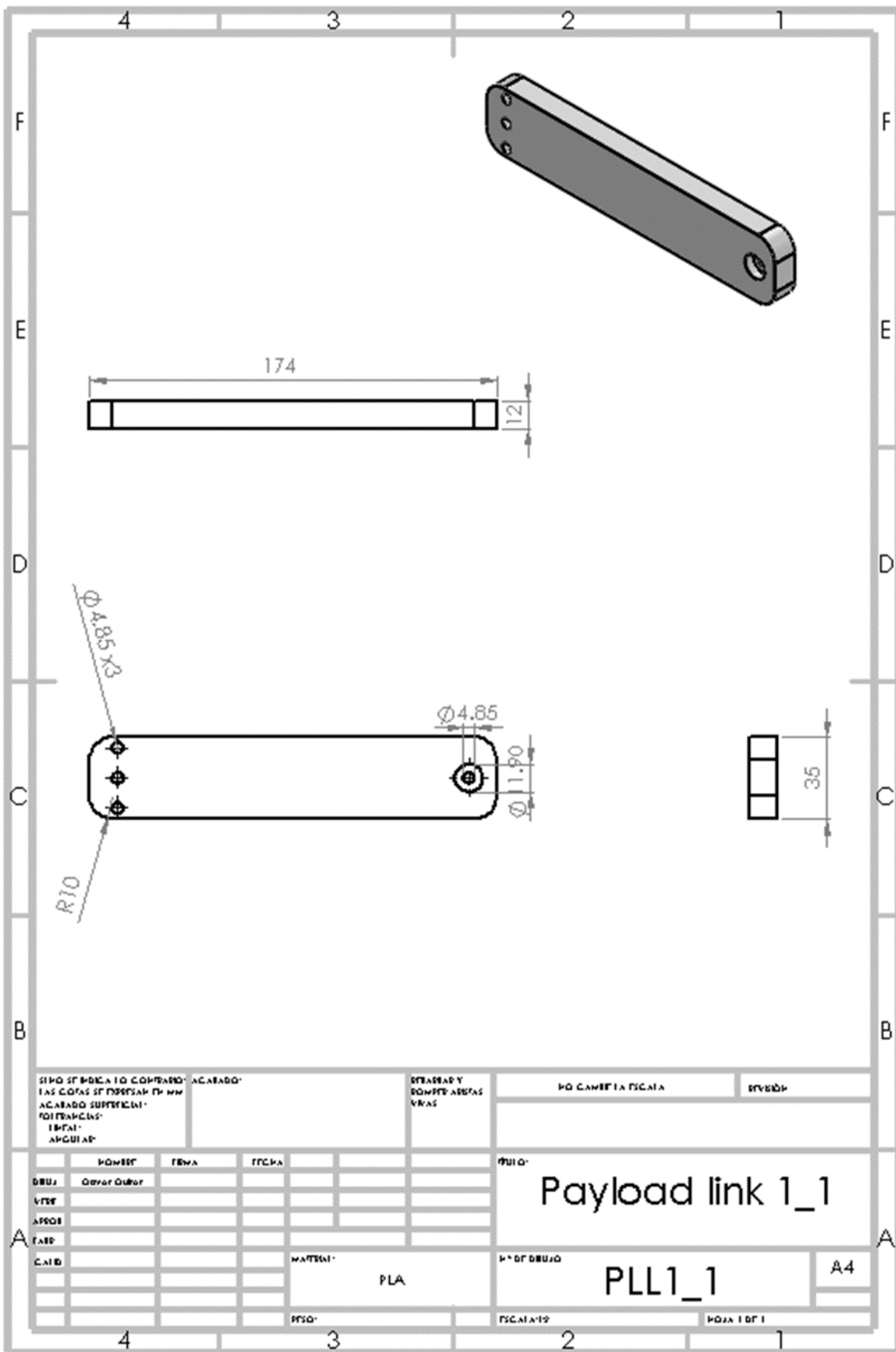




SI NO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO: LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: ISOTAS ANGULOS:		ESTADOS Y CONDICIONES VERAS		NO CAMBIA ESCALA	REVISO:
PROYECT:	ESCALA:	FECHA:		TITULO:	
DRUJ:	Queser Ouhar			Payload junction	
VIST:					
APROJ:					
FASE:					
C.AID:		MATERIAL:	PLA	Nº DE DIBUJO:	PBL
		PROJ:		ESCALA: 1:1	PÁGINA 1 DE 1



SIPO SFIMBICA TO COMBANDU ACABADO				STANDARD		NO CAMBIA ESCALA		REVIZOR	
TAS COPIAS SFIMBICAR TO MM				REVIZOR					
ACABADO SUPERFICIAL				REVIZOR					
TOLERANCIAS				REVIZOR					
TITULU				REVIZOR					
ANGULIAR				REVIZOR					
NOMER		TRASA		TRASA		TRASA		TRASA	
DBUJ		DBUJ		DBUJ		DBUJ		DBUJ	
VTRF		VTRF		VTRF		VTRF		VTRF	
APROJ		APROJ		APROJ		APROJ		APROJ	
TARD		TARD		TARD		TARD		TARD	
C.AID		C.AID		C.AID		C.AID		C.AID	
MATERIAL				MATERIAL		MATERIAL		MATERIAL	
PLA				PLA		PLA		PLA	
PSO				PSO		PSO		PSO	
ESCALA				ESCALA		ESCALA		ESCALA	
HOJA 1 OF 1				HOJA 1 OF 1		HOJA 1 OF 1		HOJA 1 OF 1	
A4				A4		A4		A4	
Center Bearing				Center Bearing		Center Bearing		Center Bearing	
CBW2DF				CBW2DF		CBW2DF		CBW2DF	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO:
 LAS COTAS SE MEDIRAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 POLTRANCAS:
 ENTAL:
 ANQUELAS

ESTRIBOS Y
 BOMPER ASISTAS
 VIKAS

PO CAMBIA ESCALA

REVISED

	POWER	TENSA	TICHA
ORU	Over Outer		
VISE			
APROE			
FAED			

PRIO:
Payload link 1_1

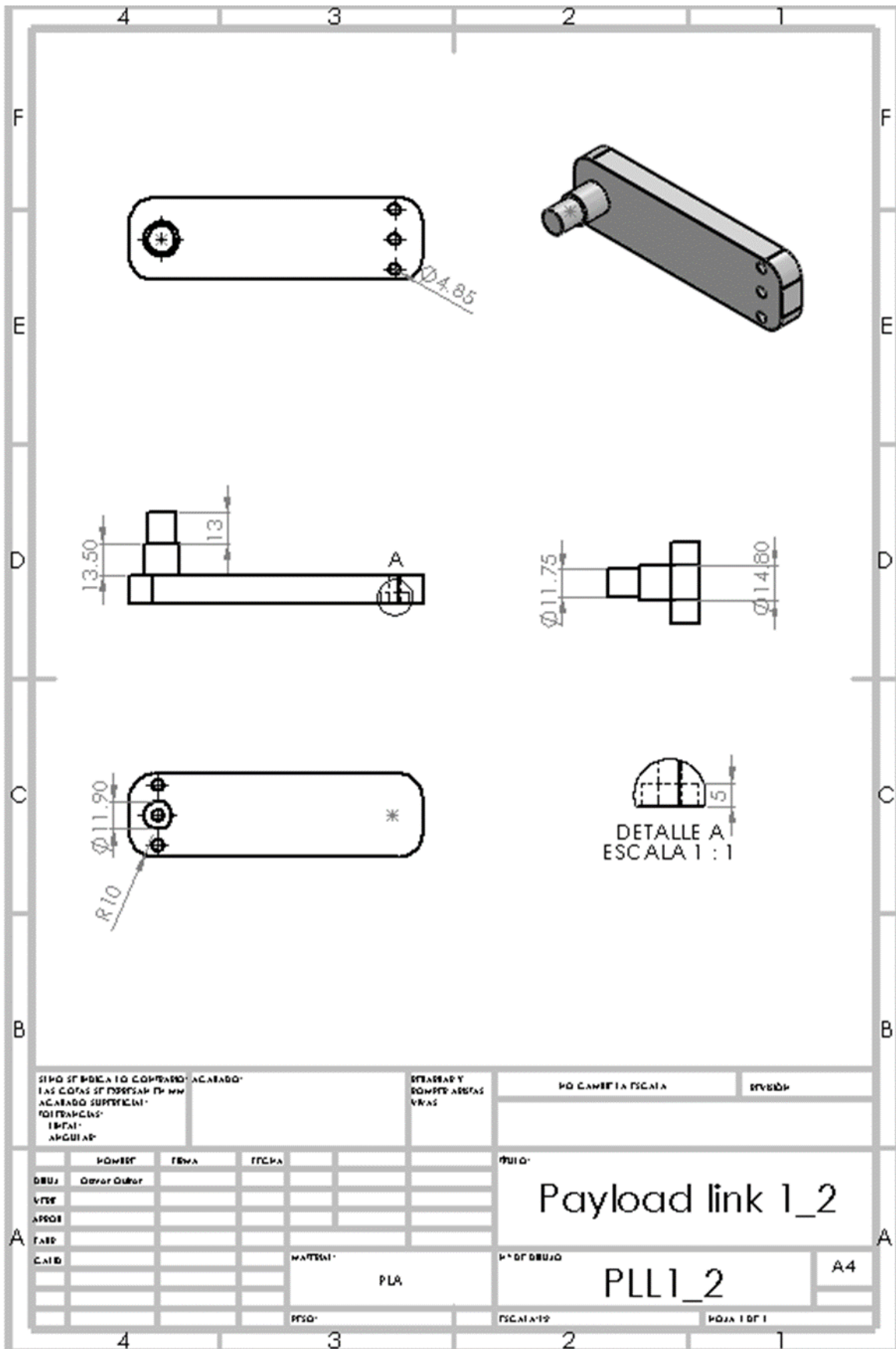
CALIB
 MATERIAL:
 PLA

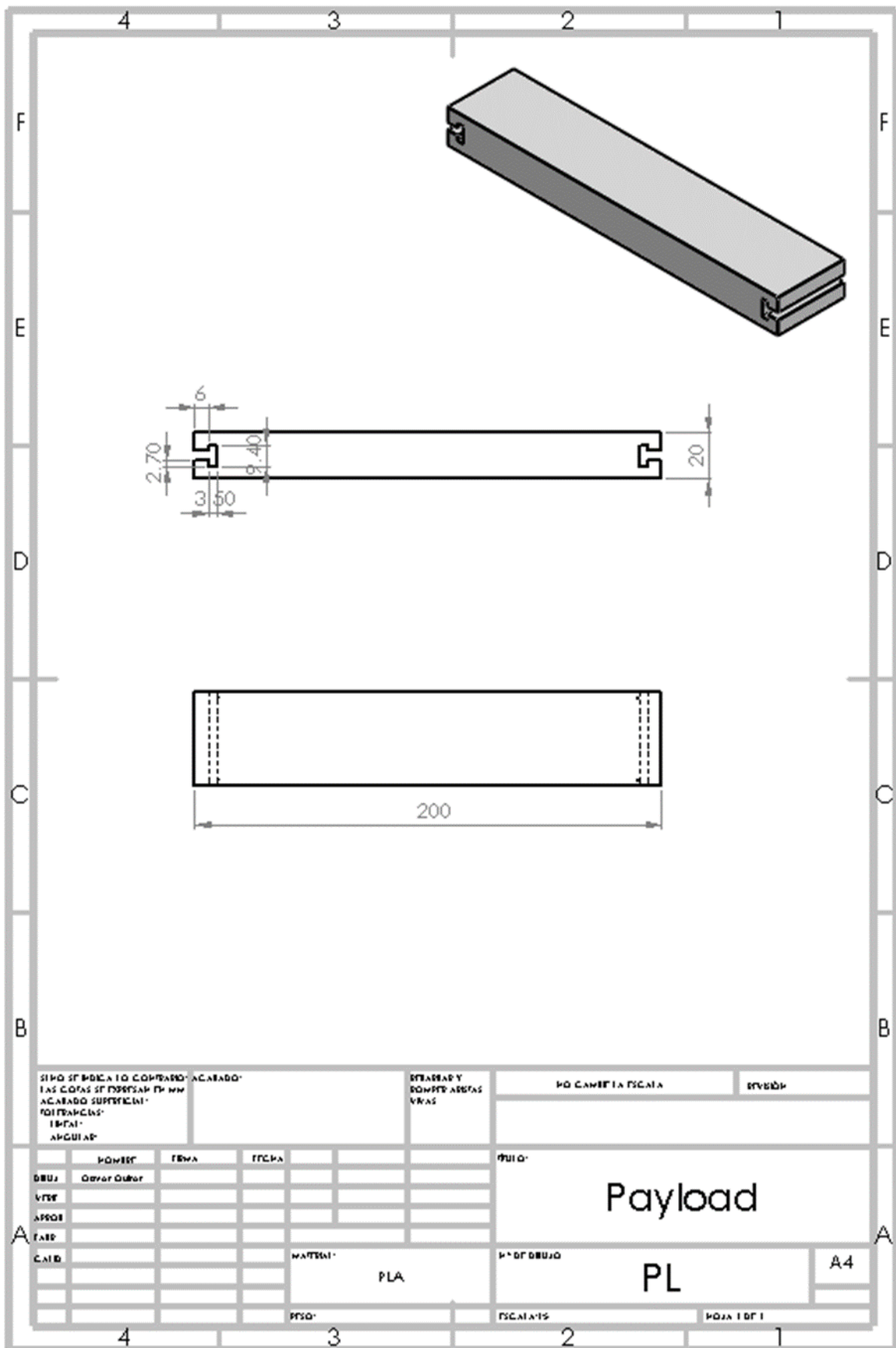
Nº DE ORUJO
PLL1_1
 A4

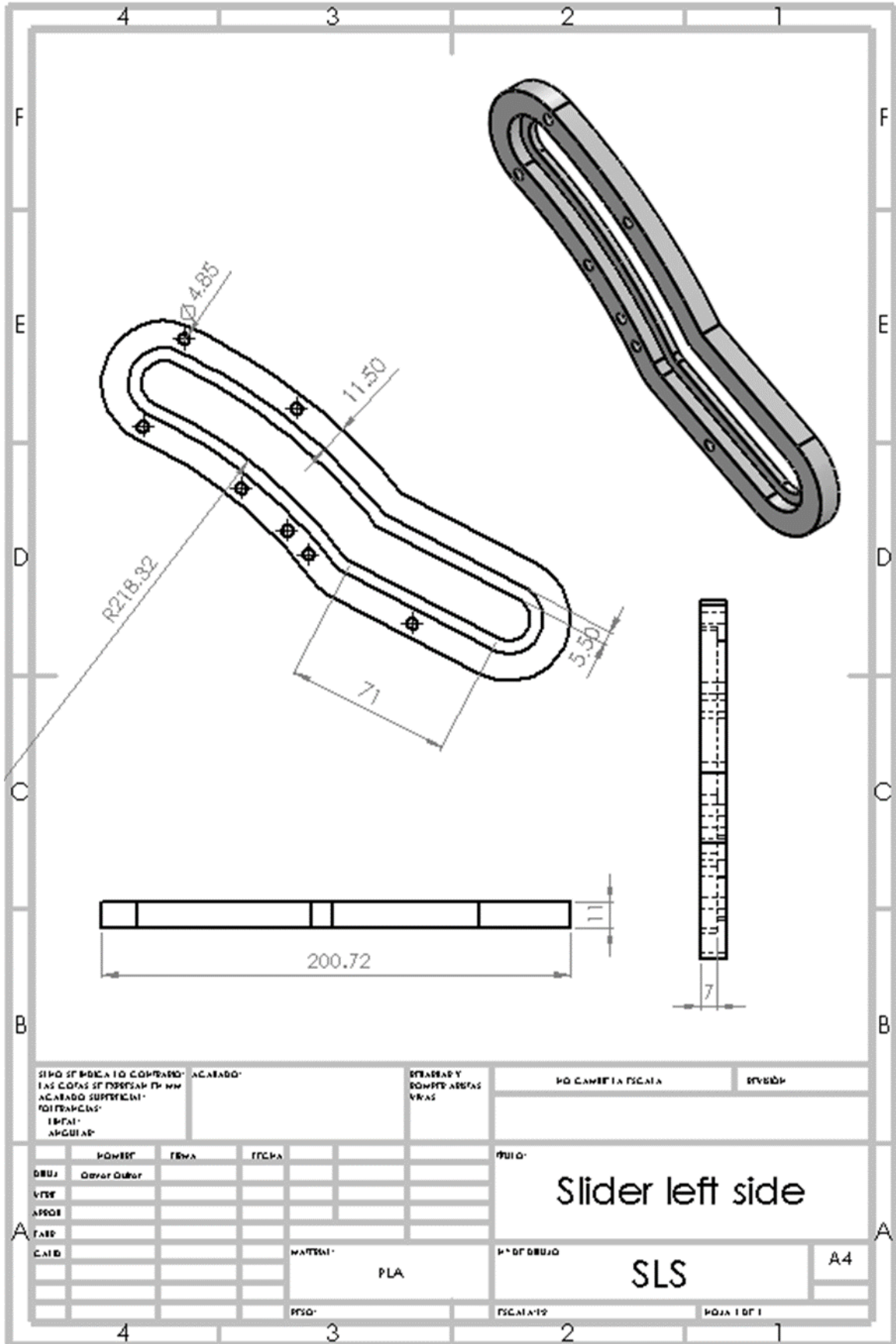
PSQ:

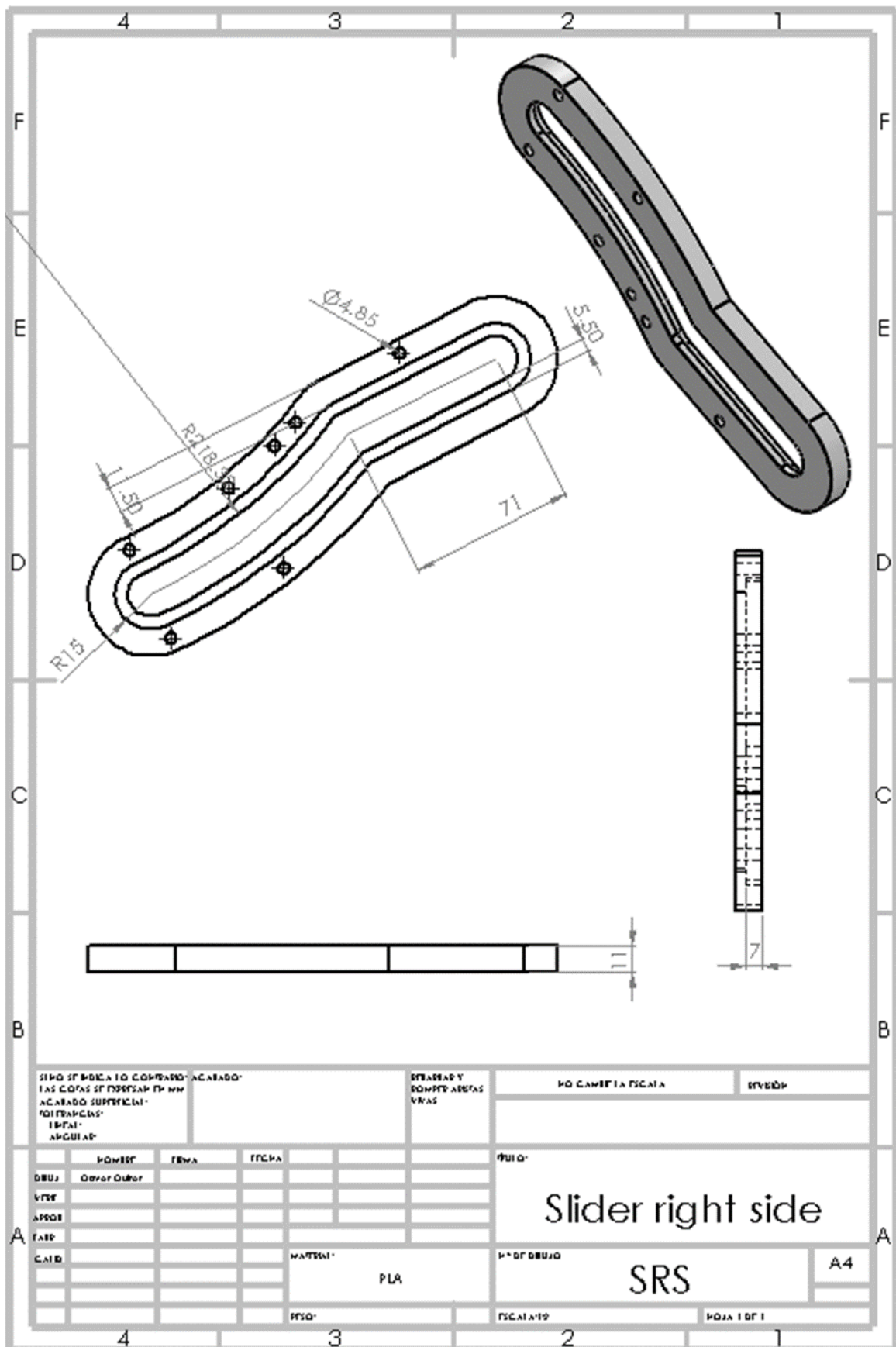
ESCALA: 1:2

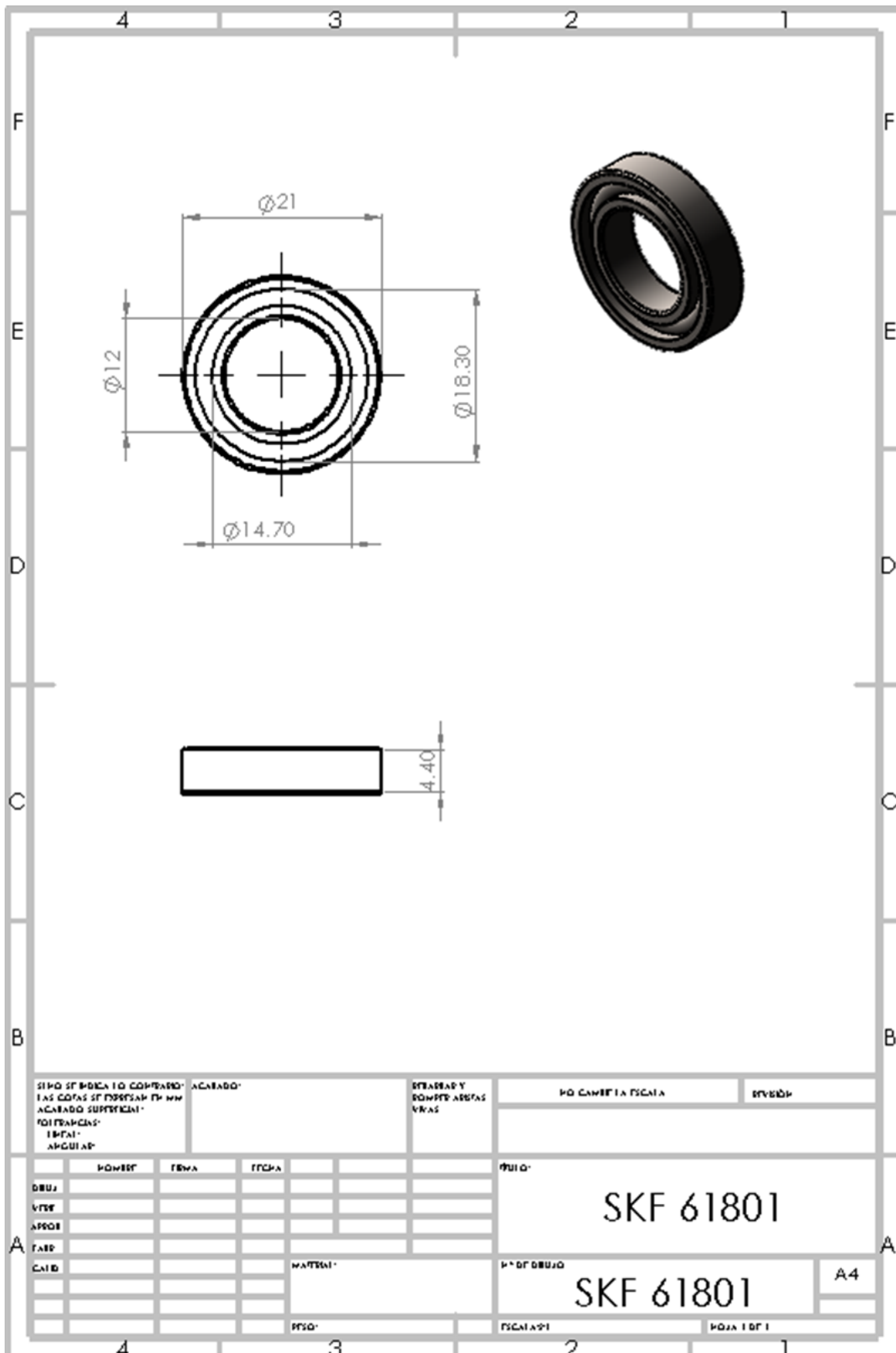
PÁGINA 1 DE 1



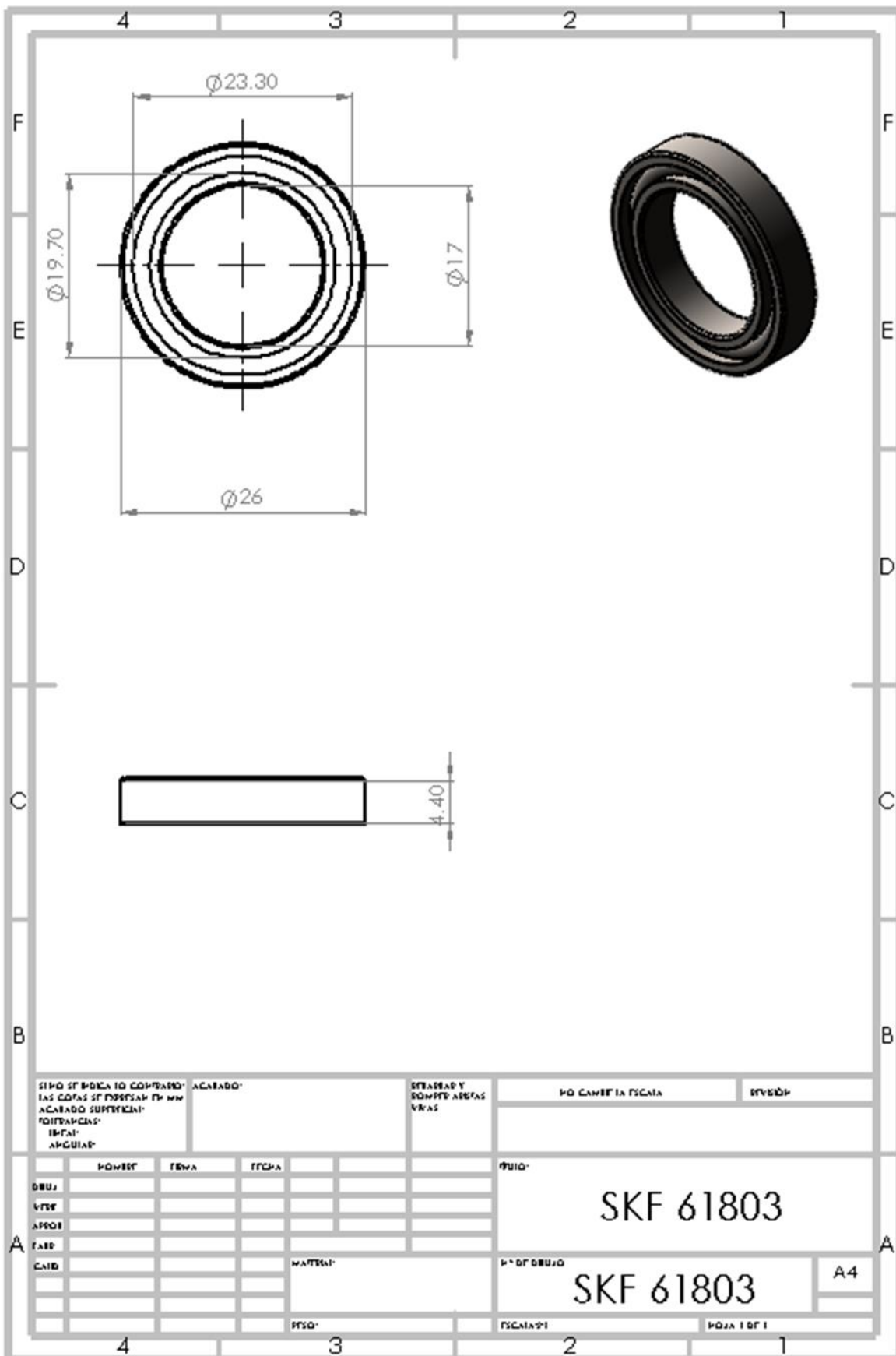




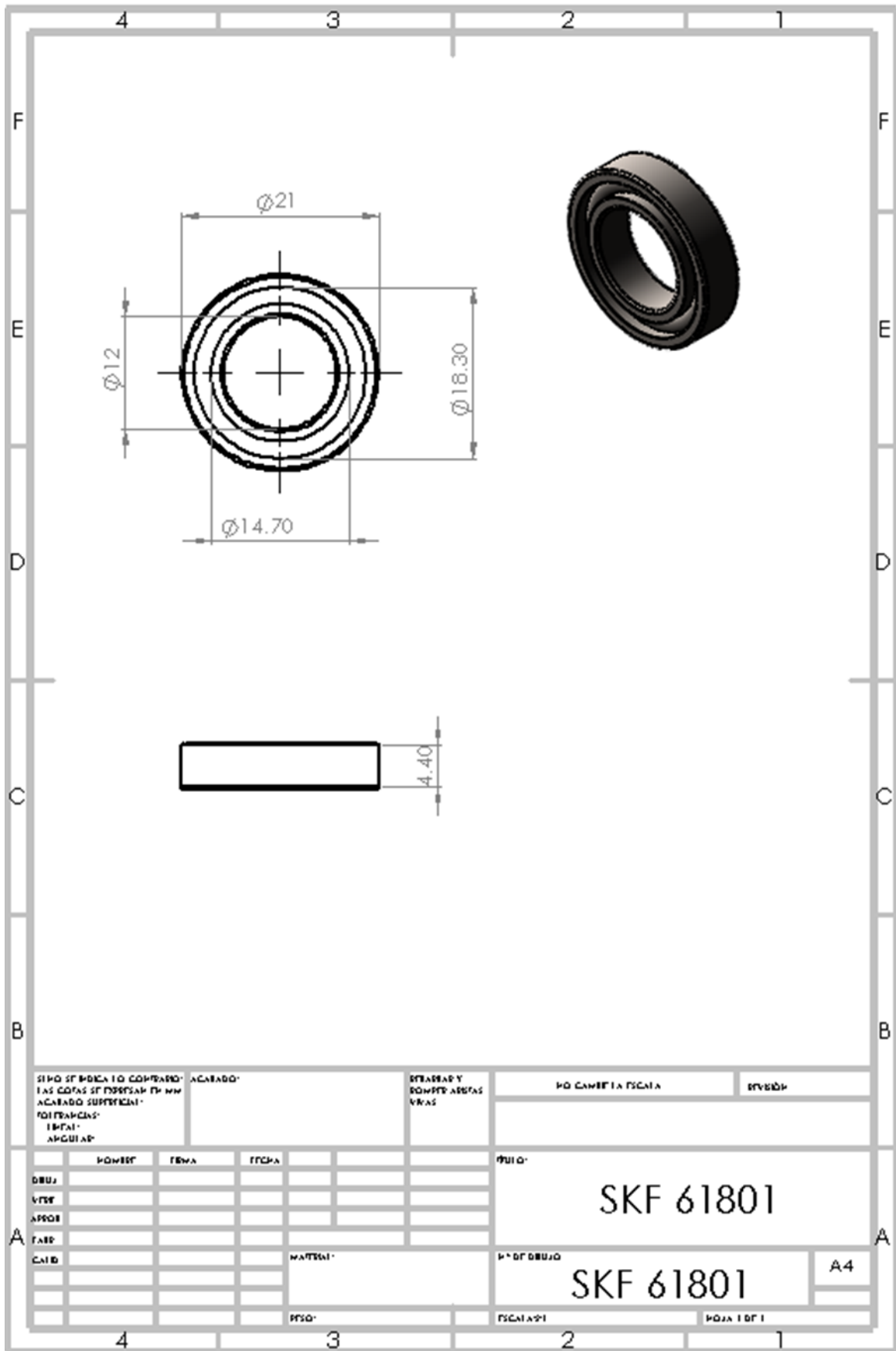




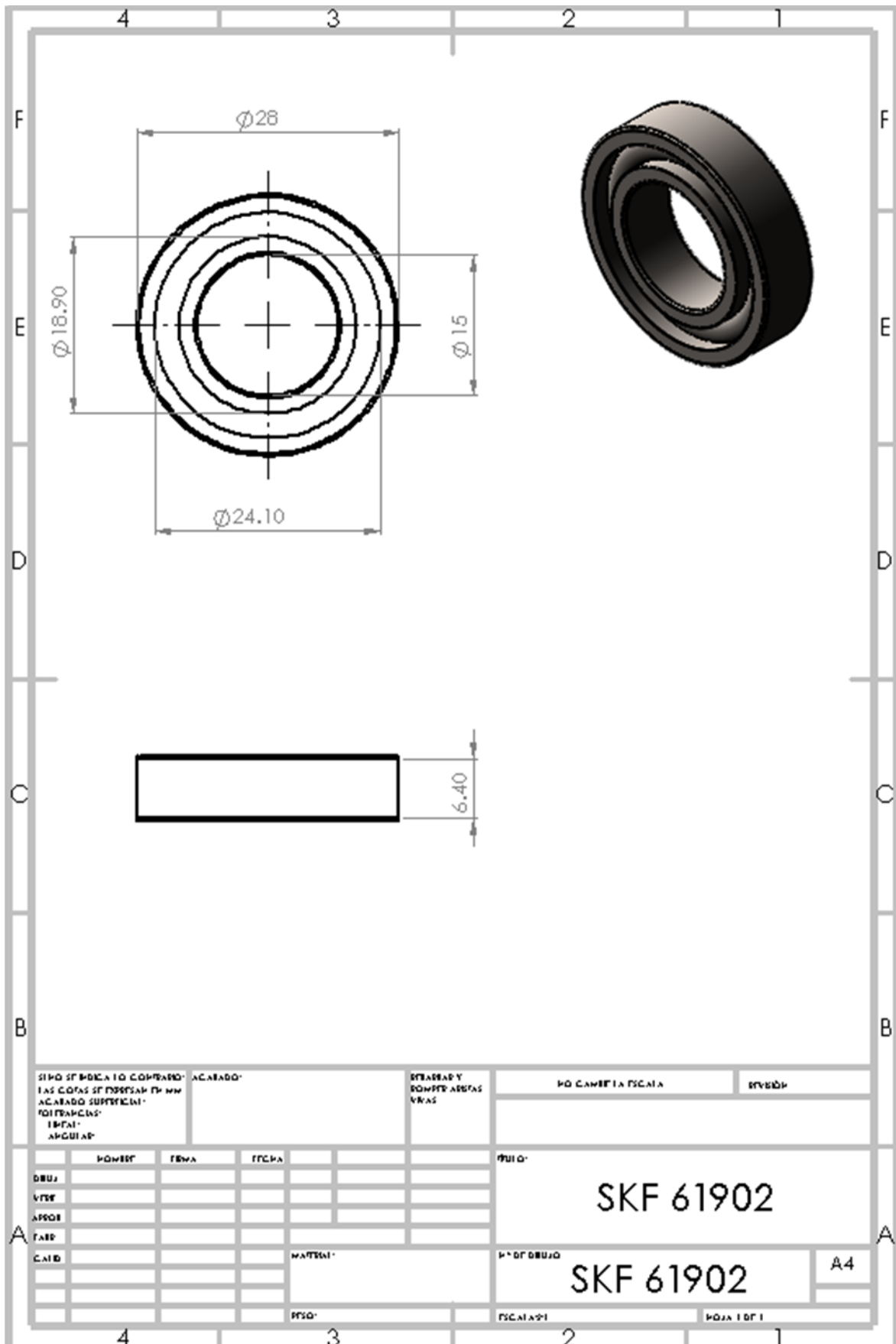
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM		ACABADO		ESTRUCAS Y DIMENSIONES VARIAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISED	
TOLERANCIAS: LINEAL ANGULAR									
POWER	GENA	ESCA				Nº DE DIBUJO			
DIBUJ						SKF 61801			
VIST									
APROB									
TAJE									
CAD						Nº DE DIBUJO			
						SKF 61801			
						HOJA 1 DE 1			
						A4			



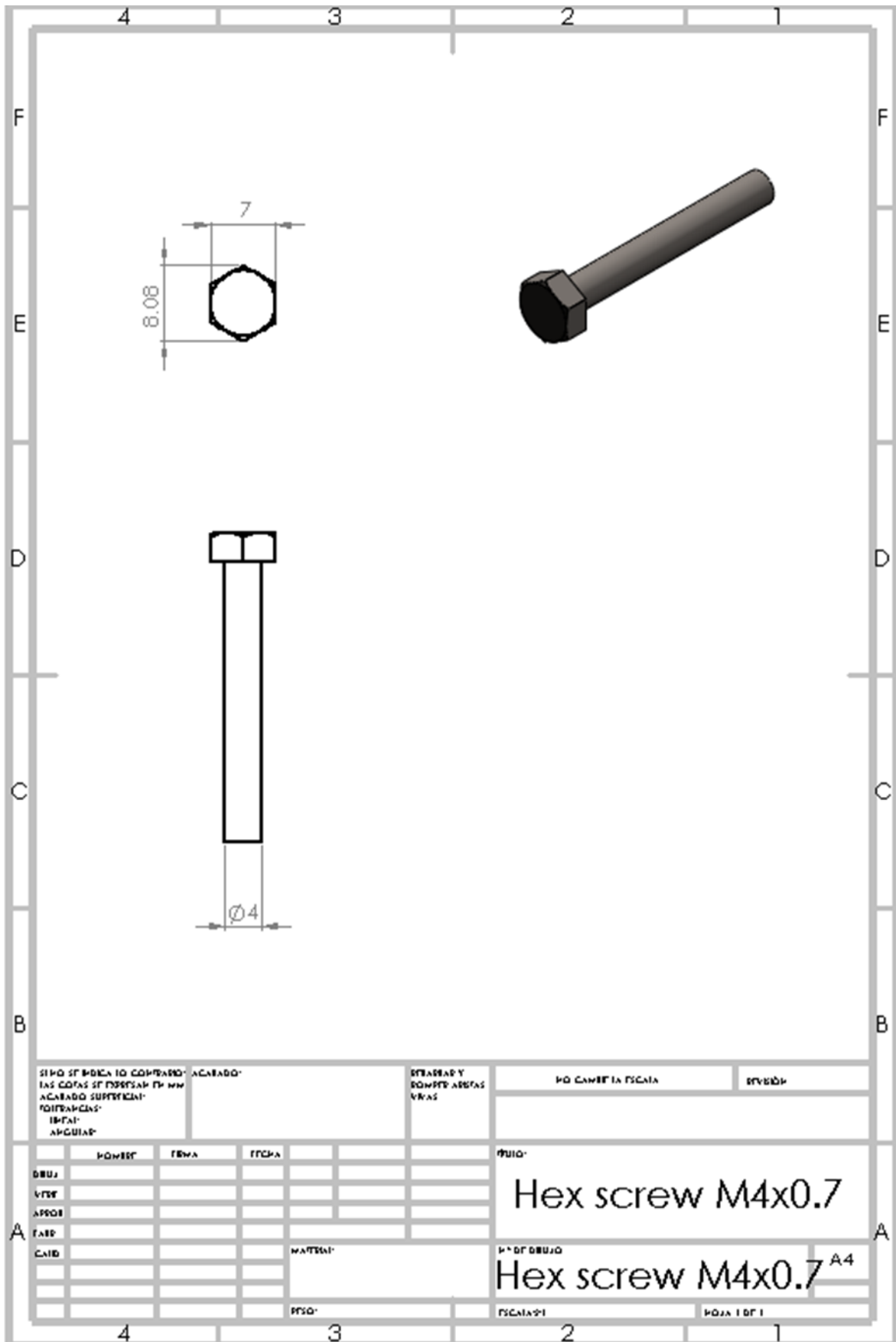
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: RUGOSIDADES: TOLERANCIAS: ANGULOS:		ESTRUC. Y DIMENS. ASIST. VARIAS		NO CAMBIA LA ESCALA	REVISED
POWER	TEMP	TEMP		PRINCIPAL	
DRUJ				SKF 61803	
VIVE					
APROE					
LABE					
CAMB		MATERIAL		Nº DE DIBUJO	
				SKF 61803	
		PROD		ESCALA	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: LIMPIO ANGULAR		ACABADO:	OTRO:	NO CAMBIA ESCALA	REVISO:
POWER	FORMA	ESCALA	TITULO:		
DRUJ			SKF 61801		
VIVE					
APROB					
FASE					
CAD		MATERIAL:	Nº DE DIBUJO		A4
		REF:	ESCALA:	FOJA 1 DE 1	



SE PO SE INDICA LO CONTRARIO ACABADO:		ACABADO:		ESTRUCURA Y		NO CAMBIA LA PESADA		SERVIDO	
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM				COMPRE ARISTAS					
ACABADO SUPERFICIE:				VIRAS					
TOLERANCIA:									
ANGULO:									
POWER	FORMA	ESCALA				PROD:			
DRUJ						SKF 61902			
VITE									
APROB						SKF 61902			
LAB									
CALIB						MATERIA:		A4	
						PESO:			
						ESCALA:		NOVA 1 OF 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: FOTOFANCIAS: ISOTAI: ANQUEJAR		ACABADO:	ENTREABAY: BOMPERO ABERTAS: VRIAS		NO CAMBIA EN ESCALA	REVISO:
DIBUJ VISE APROB CALIB	HOMEST TEMA TFCDA				N° DE DIBUJO Hex screw M4x0.7 Hex screw M4x0.7 ^{A4}	
			MATERIAL:		ESCALA: 2:1 HOJA 1 DE 1	