



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Diseño e implementación de un modelo a escala del rover
Curiosity con desplazamiento lateral

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica

AUTOR/A: Martínez Fernández, Sofía

Tutor/a: Casanova Calvo, Vicente Fermín

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

El Rover Curiosity es una pieza clave en las misiones de exploración marciana de la NASA y ha demostrado que es capaz de moverse en ambientes irregulares. Sin embargo, su capacidad para desplazarse lateralmente siempre ha sido limitada, lo que ha inspirado la realización de este trabajo fin de máster.

El objetivo de este trabajo se centra en el diseño, mediante herramientas de diseño CAD, de un modelo a escala del Rover Curiosity incorporando un mecanismo para que pueda realizar desplazamientos laterales.

El diseño propuesto se basará en añadir dos servomotores en las ruedas centrales del rover, de esta manera, todas las ruedas podrán girar 90º permitiendo el desplazamiento lateral del vehículo. Para comprobar que el diseño planteado es válido, se realizará un estudio de su comportamiento en diferentes situaciones con el entorno de simulación multicuerpo para sistemas mecánicos tridimensionales *Simscape Multibody* de *Matlab*.

Una vez completado y estudiado el diseño, se procederá a la implementación del modelo a escala mediante un *Arduino*, demostrando que la capacidad de desplazamiento lateral supondría una mejora muy importante en los rovers de exploración marciana.

Palabras Clave: Rover Curiosity. CAD. Simscape Multibody. Arduino. Desplazamiento Lateral.

Abstract

Curiosity Rover is a key part of NASA's Mars exploration missions and has demonstrated the ability to move in irregular environments. However, its ability to move laterally has always been limited, which has inspired this master's thesis.

The aim of this thesis is to design, using CAD design tools, a scale model of the Curiosity Rover that incorporates a mechanism to allow it to move sideways.

The proposed design will be based on the addition of two servo motors to the central wheels of the rover, in this way, all wheels will be able to rotate 90 degrees, allowing the vehicle to move laterally. In order to verify the validity of this proposed design, a study of its behaviour in different situations will be carried out using the *Simscape Multibody* simulation environment for three-dimensional mechanical systems in *Matlab*.

Once the design has been completed and studied, the model will be implemented using an *Arduino*, demonstrating that the ability to move sideways would be a very important improvement to the Mars exploration rovers.

Keywords: Rover Curiosity. CAD. Simscape Multibody. Arduino. Lateral Displacement.

Resum

El Rover Curiosity és una peça clau en les missions d'exploració marciana de la NASA i ha demostrat que és capaç de moure's en ambients irregulars. No obstant això, la seua capacitat per a desplaçar-se lateralment sempre ha sigut limitada, la qual cosa ha inspirat la realització d'este treball fi de màster.

L'objectiu d'este treball se centra en el disseny, mitjançant ferramentes de disseny CAD, d'un model a escala del Rover Curiosity incorporant un mecanisme perquè puga realitzar desplaçaments laterals.

El disseny proposat es basarà a afegir dos servomotors en les rodes centrals del rover, d'esta manera, totes les rodes podran girar 90° permetent el desplaçament lateral del vehicle. Per a comprobar que el disseny plantejat és vàlid, es realitzarà un estudi del seu comportament en diferents situacions amb l'entorn de simulació multicorps per a sistemes mecànics tridimensionals *Simscape Multibody* de *Matlab*.

Una vegada completat i estudiat el disseny, es procedirà a la implementació del model a escala mitjançant un *Arduino*, demostrant que la capacitat de desplaçament lateral suposaria una millora molt important en els rovers d'exploració marciana.

Paraules Claus: Rover Curiosity. CAD. Simscape Multibody. Arduino. Desplaçament Lateral.

Índice de contenidos

1. Introducción	10
1.1 ANTECEDENTES	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA	12
2. Rover Curiosity	14
2.1 DESCRIPCIÓN DEL ROVER	15
2.2 MISIÓN DEL ROVER.....	16
2.3 SISTEMA DE SUSPENSIÓN ROCKER-BOGIE DEL ROVER.....	18
2.4 PROTOTIPO DE MEJORA DEL ROVER.....	20
3. Diseño CAD.....	21
4. Simulaciones del modelo	25
4.1 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER	32
4.2. SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER CON RAMPAS	35
4.3 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER SUBIENDO ESCALONES	37
4.4 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER EN UNA PISTA DE OBSTÁCULOS.....	39
5. Implementación del modelo	43
5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS.....	43
5.1.1 Placa ELEGOO MEGA 2560 R3	43
5.1.2 Módulo Controlador de Servos PCA9685	44
5.1.3 Driver L9110.....	45
5.1.4 Micro Servo MG90s.....	46
5.1.5 Motor de Engranajes Micro DC N20.....	46
5.2 MONTAJE DEL MODELO.....	47
6. Conclusiones y Trabajo Futuro.....	53
7. Referencias.....	55
8. Anexos	57
ANEXO 1. PROGRAMACIÓN.....	57
ANEXO 2. PLIEGO DE CONDICIONES	65
2.1 Objeto del Pliego.....	65
2.2 Condiciones Generales.....	65

2.3 Condiciones de Ejecución	65
2.4 Puesta en Marcha.....	66
ANEXO 3. PRESUPUESTO.....	67
ANEXO 4. PLANOS	69

Índice de Figuras

Figura 1.1. Resultado del TFM de Shaida Alarcón.....	11
Figura 2.1. El Rover Curiosity	14
Figura 2.2. Composición del Rover Curiosity.....	15
Figura 2.3. Lanzamiento del atlas V541.	16
Figura 2.4. El Rover Curiosity a través de los años.	18
Figura 2.5. Funcionamiento del Rocker-Bogie.....	19
Figura 2.6. Rocker-Bogie vs Suspensión fija superando un obstáculo.	19
Figura 3.1. Diseño del chasis (Body Top).....	21
Figura 3.2. Diseño de la barra estabilizadora.	22
Figura 3.3. Diseño del bogie delantero (Front Bogie).	22
Figura 3.4. Diseño del soporte de las ruedas.	23
Figura 3.5. Diseño de la rueda.....	23
Figura 3.6. Diseño del neumático.	24
Figura 4.1. Modelo de simulación.....	25
Figura 4.2. Subsistema Body_Top.	26
Figura 4.3. Subsistema Stabilizing_Bar.	27
Figura 4.4. Subsistema Front_Bogie.	28
Figura 4.5. Subsistema Rear_Bogie.	29
Figura 4.6. Subsistema Wheel.....	30
Figura 4.7. Bloque <i>Signal Builder</i> y ganancias de las señales.	31
Figura 4.8. Bloques <i>Spatial Contact Force</i>	32
Figura 4.9. Simulación 1:Desplazamiento lateral del rover.	33
Figura 4.10. Obtención de las gráficas.	33
Figura 4.11. Gráficas de la Simulación 1.....	34
Figura 4.12. Simulación 2: Rampas.	35
Figura 4.13. Gráficas de la Simulación 2.....	36
Figura 4.14. Simulación 3: Escalones.	37
Figura 4.15. Gráficas de la Simulación 3.....	38
Figura 4.16. Simulación 4: Pista de obstáculos.....	39
Figura 4.17. Simulación 4 sin barra estabilizadora.....	40
Figura 4.18. Gráficas de la Simulación 4.....	41
Figura 4.19. Gráficas de la Simulación 4 sin barra estabilizadora.	42
Figura 5.1. Placa ELEGOO Mega 2560 R3.	43
Figura 5.2. Módulo PCA985.	44
Figura 5.3. Driver L9110.	45
Figura 5.4. Servo MG90s.	46
Figura 5.5. Motor Micro DC N20.....	47
Figura 5.6. Esquema de conexión de los servomotores.....	48

Figura 5.7. Portapilas de 4x1,5V.	48
Figura 5.8. Esquema de conexiones de los motores.	49
Figura 5.9. Mini Breadboard de 170 pines.	49
Figura 5.10. Montaje de prueba de todos los componentes.	50
Figura 5.11. Integración de la estructura y la electrónica.	51
Figura 5.12. Rover implementado (vista inferior).	51

Índice de Tablas

Tabla 5.1. Especificaciones técnicas ELEGOO MEGA 2560 R3.....	41
Tabla 5.2. Especificaciones técnicas Módulo PCA9685.....	43
Tabla 5.3. Especificaciones técnicas Driver L9110.....	43
Tabla 5.4. Especificaciones técnicas Servo MG90s.....	44
Tabla 5.5. Especificaciones técnicas Micro DC N20.....	47

1. Introducción

La exploración de Marte es un fascinante campo de estudio, en el cual se desarrolla muchísima tecnología, dentro de la búsqueda incansable del ser humano por descubrir los confines del universo. Una de esas tecnologías desarrolladas es la exploración robótica, convirtiéndose en una herramienta indispensable.

Entre los hitos de la exploración marciana destaca el desarrollo del Rover Curiosity de la NASA. Este vehículo de exploración marciana ha desempeñado un papel crucial en la adquisición de información sobre la superficie del Planeta Rojo, además, ha sido capaz de recorrer más de 30 km por el complejo e irregular terreno marciano. Todo esto se debe a que posee una gran capacidad para maniobrar y moverse por terrenos complejos y obstaculizados.

Este trabajo fin de máster se centra en lograr aumentar la movilidad del Curiosity mediante la incorporación del desplazamiento lateral entre sus movimientos convirtiéndolo en un vehículo holonómico. Para ello, se utilizará el software de diseño mecánico *SolidWorks* para adaptar la estructura del Curiosity modificando la forma de sus bogies traseros, de tal forma que sus dos ruedas centrales dejen de ser estáticas para ser ruedas directrices, al igual que el resto de las ruedas, esto permite que todas las ruedas del vehículo giren hasta 90º y este se desplace de forma lateral y diagonal. Además, se ha utilizado el software *Simscape Multibody* de *Matlab* para estudiar el comportamiento del diseño planteado y, por último, el entorno *Arduino* para programar el manejo del vehículo. Todos ellos son programas para los que será necesario aplicar muchos de los conocimientos adquiridos durante el Máster de Ingeniería Mecatrónica impartido en la Universidad Politécnica de Valencia.

1.1 ANTECEDENTES

La exploración espacial ha sido una empresa humana que ha capturado el interés, la imaginación y el ingenio de científicos, ingenieros y entusiastas por igual. Desde la llegada del hombre a la luna el 20 de julio de 1969 hasta las misiones en activo de la actualidad, se han desarrollado y lanzado cientos de misiones espaciales por todos los planetas del Sistema Solar.

Entre las misiones más importantes se encuentran las de exploración marciana lanzadas por la NASA y entre ellas, el Rover Curiosity destaca como un hito de ingeniería y exploración científica. Este explorador espacial forma parte de la misión *Mars Science Laboratory (MSL)* con el objetivo principal de analizar las condiciones del planeta para determinar si alguna vez hubo vida en Marte.

Este trabajo se sitúa en este contexto del trabajo fin de máster de la antigua alumna Shaida Alarcón Rubio titulado *“Diseño, implementación y control remoto de un modelo a escala del rover Perseverance”*, adaptándolo a un modelo del rover Curiosity y convirtiendo las dos únicas ruedas estáticas en ruedas direccionales. [1]

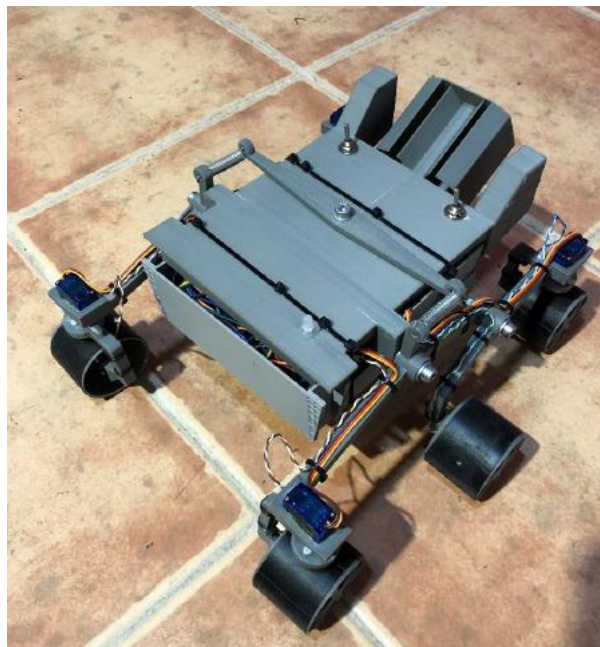


Figura 1.1. Resultado del TFM de Shaida Alarcón.

1.2 OBJETIVOS

Este trabajo consiste en el diseño y la implementación de un modelo a escala 1:10 de Rover Curiosity con sus seis ruedas direccionables.

Los objetivos de este estudio son:

- Diseñar mediante SolidWorks un modelo a escala de un vehículo robotizado de exploración marciana.
- Diseñar un sistema de desplazamiento lateral que sea compatible con la estructura y los sistemas del Rover Curiosity
- Simular el diseño mediante el software *Simscape Multibody* de Matlab.
- Estudiar el comportamiento del diseño propuesto mediante diferentes pruebas.
- Emplear la impresión 3D para obtener la estructura del prototipo.
- Implementar la electrónica del modelo.
- Desarrollar el manejo del prototipo mediante el entorno *Arduino*.

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA

Esta memoria comienza con la presentación del rover Curiosity mediante una descripción detallada del vehículo, incluyendo algunas de sus características técnicas y mencionando algunos de los instrumentos científicos que porta. Además, se ofrecerá una visión general sobre la misión *Mars Science Laboratory*, en la que el rover Curiosity desempeña un papel fundamental y se explicará al detalle el funcionamiento del sistema de suspensión Rocker-Bogie utilizado en el vehículo, resaltando su capacidad para superar obstáculos.

Posteriormente, se explicará el proceso de diseño de las piezas que conforman la estructura del modelo a desarrollar, así como las características de su impresión 3D, y se presentarán los diseños 3D realizados de cada una de ellas.

En el siguiente punto se detallarán las simulaciones llevadas a cabo para evaluar el comportamiento y el rendimiento del modelo a escala desarrollado en diversas condiciones de terreno y escenarios.

A continuación, se mostrarán los distintos componentes utilizados en la construcción del modelo, destacando las características claves de cada uno de ellos, y se describirá el proceso de montaje e implementación del vehículo diseñado.

Para finalizar se sacarán una serie de conclusiones y propuestas de mejora sobre los distintos procesos que han sido abarcados a lo largo de este trabajo y se presentarán los anexos desarrollados paralelamente a la realización del modelo, entre los que destacan: los códigos de programación, el pliego de condiciones, el presupuesto y los planos de las piezas utilizadas.

2. Rover Curiosity

Desde hace décadas, el ser humano se ha embarcado en una lucha búsqueda incansable para comprender los secretos del universo y los misterios del sistema solar, en el que se encuentra ubicado nuestro planeta, para ello la humanidad ha desplegado una serie de misiones espaciales para comprender el cosmos. Una de esas misiones es la del Rover Curiosity, el cuál fue enviado a Marte para poder conocer más detalles sobre el Planeta Rojo.

En este capítulo se va a profundizar sobre este vehículo, comentando su misión en Marte y centrándonos en las particularidades de su diseño.



Figura 2.1. El Rover Curiosity

(Fuente: [2])

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ROVER

El Rover Curiosity es un vehículo de exploración espacial no pilotado clave en la misión Mars Science Laboratory (MSL), dicho vehículo pesa aproximadamente 900 kg y dispone de 75 kg adicionales de instrumentos científicos. [3]

Las características del suelo marciano son muy diversas, por ello, el robot necesita unas ruedas y un sistema de suspensión que permita garantizar que sus ruedas estén en contacto con el suelo independientemente de la rugosidad del terreno. Por lo tanto, se diseñaron seis ruedas de 50 cm de diámetro, cada una de ellas con un motor eléctrico independiente; de tal forma que tanto las ruedas frontales como las traseras se pudieran dirigir independientemente, permitiendo al vehículo rotar sobre su eje y superar obstáculos de hasta 65 cm de altura. [4]

La velocidad máxima que puede alcanzar el Curiosity es de 0.144 km/h, siendo diseñado para recorrer una distancia mínima de 20 km diarios durante su misión de buscar indicios de vida en el planeta. [4]

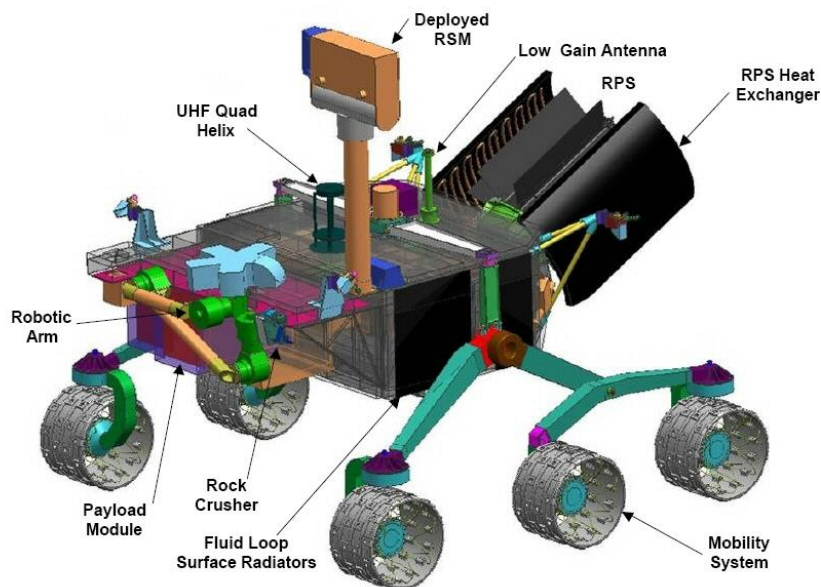


Figura 2.2. Composición del Rover Curiosity.

(Fuente: [5])

Además, el Rover Curiosity ha sido dotado del conjunto más avanzado y complejo de instrumentos científicos en la historia de la exploración de Marte, entre estos instrumentos podemos encontrar un *MastCam* para la captura de imágenes, un *ChemCam* dotado de un láser infrarrojo capaz de vaporizar rocas para su análisis y un *REMS (Rover Environmental Monitoring Stations)* para monitorizar diariamente el tiempo atmosférico marciano, entre otros muchos complejos instrumentos que permiten al vehículo obtener datos sobre el planeta. [4]

2.2 MISIÓN DEL ROVER

El atlas V541 despegó el 26 de noviembre de 2011 desde el Complejo de Lanzamiento 41 de la Base Aérea de Cabo Cañaveral y aterrizó en Marte el 6 de agosto de 2012, llevando a bordo la misión espacial Mars Science Laboratory (MSL), más conocida como Curiosity. [4] [6]



Figura 2.3. Lanzamiento del atlas V541.

(Fuente: [6])

De esta manera, el Rover Curiosity de la NASA descendió sobre Marte para cumplir con los cuatro objetivos de la misión: determinar si existió vida en Marte, caracterizar el clima marciano, determinar su geología y prepararse para la exploración humana en Marte. Para lograr esto, el “pequeño” explorador toma fotografías y muestras del polvo rocoso y del suelo de la superficie del planeta que, posteriormente, analiza.

La misión del vehículo no tripulado se ha ampliado con el tiempo, lo que le permite seguir recorriendo el planeta rojo y obliga a un equipo de ingenieros a encontrar maneras de reducir el desgaste y mantener el Rover en funcionamiento. Esto le permite seguir siendo una parte importante de la flota de misiones astrobiológicas de la NASA.

Lo más importante es que Curiosity descubrió que el agua líquida, así como los químicos y los nutrientes esenciales para la vida, estuvieron presentes en el cráter Gale durante al menos decenas de millones de años, lo cual, permite a los científicos especular sobre la posibilidad de vida del planeta. [7]

Por último, cabe destacar que, después de más de diez años y de haber conducido más de 32 kilómetros a través de un ambiente extremadamente frío bañado en polvo y radiación, el Curiosity sigue estando fuerte y la mayoría de sus equipos siguen estando operativos, a pesar de la gran acumulación de arena y polvo en sus componentes, lo que demuestra el gran nivel de tecnología e ingeniería que constituyen a este robot. [8]

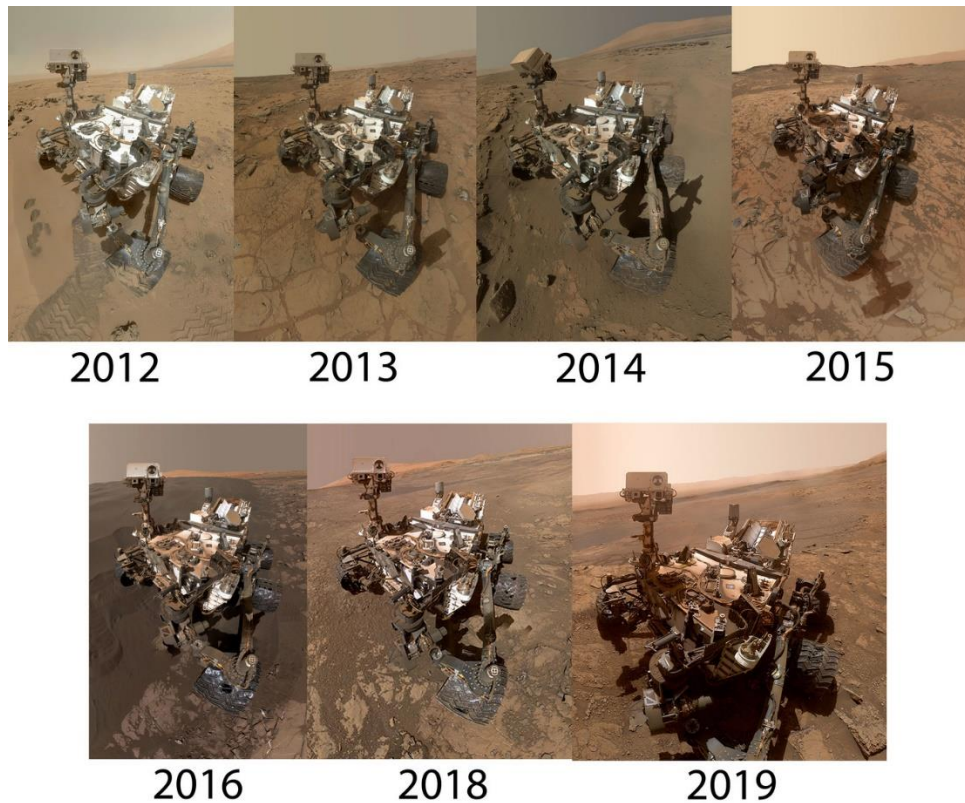


Figura 2.4. El Rover Curiosity a través de los años.

(Fuente: [3])

2.3 SISTEMA DE SUSPENSIÓN ROCKER-BOGIE DEL ROVER

El Rover Curiosity utiliza un sistema de suspensión rocker-bogie. Este sistema de suspensión utilizado por la NASA destaca sobre los demás ya que le permite al vehículo superar obstáculos de un tamaño 50% mayor que el diámetro de su rueda, facilitando la movilidad del rover. [9]

Este sistema de suspensión está compuesto por dos piezas articuladas unidas pero que conservan su libertad de giro.

La primera de las piezas es el **Rocker** o balancín, es la pieza que va unida al cuerpo del rover y se mueve de manera basculante mediante un mecanismo diferencial, de esta manera cuando el rocker de un lado sube, el del otro lado baja y viceversa.

La otra pieza que compone a este tipo de suspensión es le **Bogie** o eslabón, esta pieza se comporta como un pivote libre conectado a uno de los extremos del rover facilitando la división y distribución homogénea de la cargas. [10]

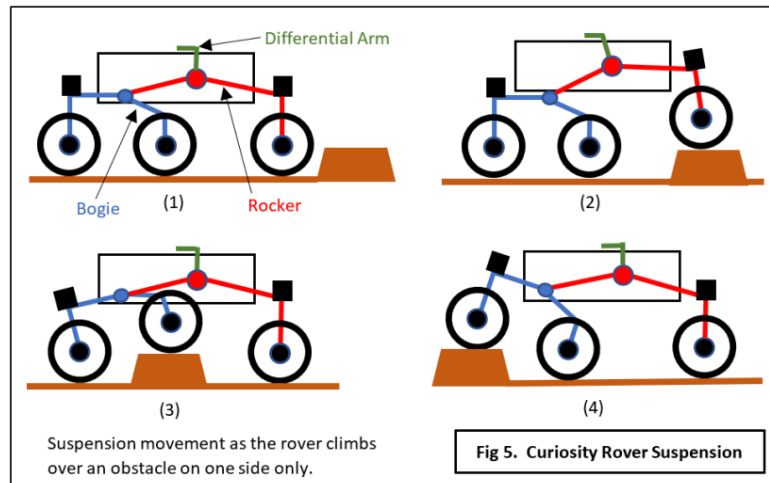


Figura 2.5. Funcionamiento del Rocker-Bogie.

(Fuente:[11])

Esta suspensión permite garantizar un alto grado de movilidad en el rover, debido a que, gracias a su diseño, siempre se mantienen las seis ruedas en contacto con el suelo permitiendo al vehículo salvar obstáculos de diferentes tamaños y evitando que se quede encallado.

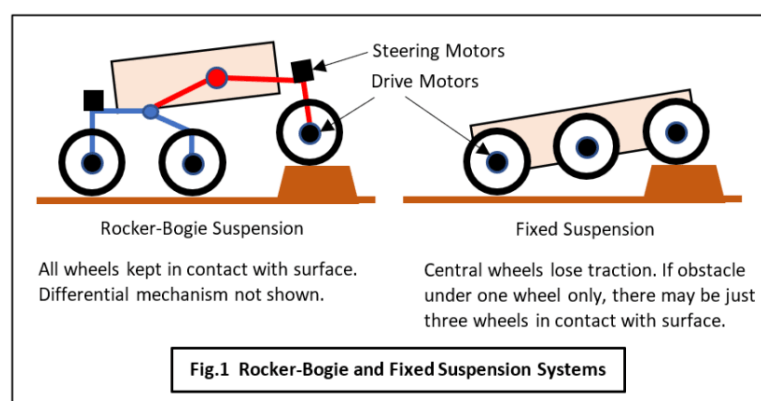


Figura 2.6. Rocker-Bogie vs Suspensión fija superando un obstáculo.

(Fuente: [12])

2.4 PROTOTIPO DE MEJORA DEL ROVER

El objetivo de este trabajo fin de máster es desarrollar un prototipo de una versión mejorada del rover Curiosity explicado en los apartados anteriores. Dicha mejora consiste en la inclusión de otro grado de libertad al vehículo, es decir, se le añade una nueva posibilidad de movimiento como es el desplazamiento lateral o en diagonal del explorador.

La principal diferencia entre este nuevo prototipo y la versión original del Curiosity se centra en las ruedas centrales del vehículo. En el rover utilizado por la NASA dichas ruedas no son directrices, mientras que en este nuevo prototipo se plantea la posibilidad de permitir que dichas ruedas sean directrices y controlables. Además, debido a que el funcionamiento de las nuevas ruedas directrices es completamente independiente del funcionamiento del resto de las ruedas, se le dota al vehículo de la capacidad de alinear sus ruedas perpendicularmente a la trayectoria de avance habitual del rover.

Esta mejora dota al explorador de una nueva variedad de movimientos, los cuales, sumados al sistema de suspensión Rocker-Bogie con el que se diseñó el rover, facilitarían al explorador marciano la navegación en terrenos complicados y aumentarían la maniobrabilidad en entornos restringidos, permitiendo al rover recabar una mayor cantidad de datos sobre el Planeta Rojo.

3. Diseño CAD

Para el diseño y la implementación del vehículo se diseñaron las piezas que lo componen en SolidWorks. Para ello, se adaptaron las piezas del modelo a escala 1:10 del Rover Curiosity de la NASA encontradas en el repositorio de GitHub de *javacasm*. [13]

El modelo consta de 24 piezas, de las cuales 20 han sido impresas en **PLA**. El filamento PLA (ácido poliáctico) es el elegido por defecto en la mayoría de las impresiones en 3D, debido a que permite imprimir a bajas temperaturas y es un material con una buena resistencia mecánica. Las otras 4 piezas restantes corresponden a los neumáticos, los cuales fueron impresos mediante **Z-FLEX**. El Z-PLEX es un filamento flexible basado en poliéster que se trata de un material que permite cierta deformación. [14]

El diseño de estas piezas se realizó con las operaciones básicas de SolidWorks: extruir saliente/base y extruir corte. A continuación, se muestran las piezas utilizadas en el diseño del modelo del Curiosity.

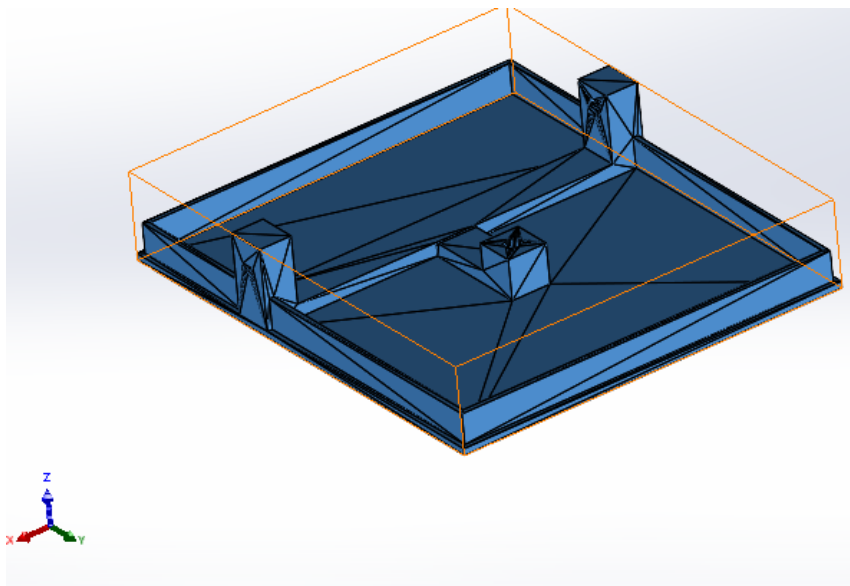


Figura 3.1. Diseño del chasis (Body Top).

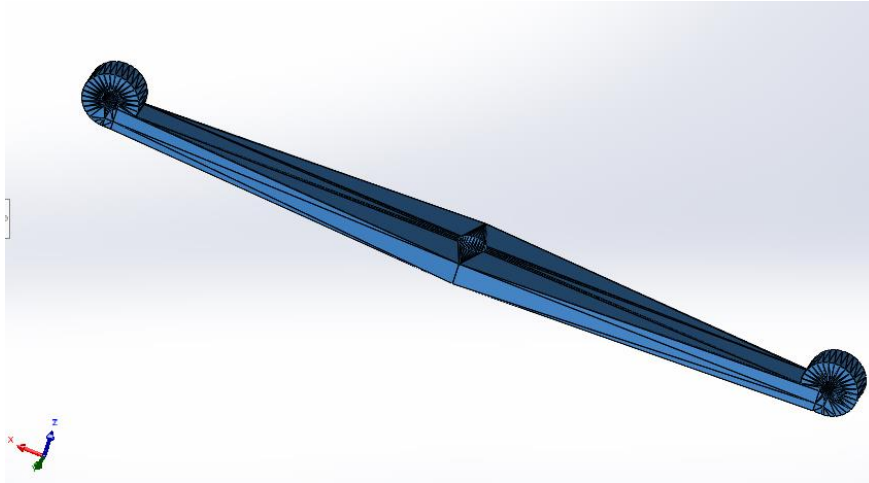


Figura 3.2. Diseño de la barra estabilizadora.

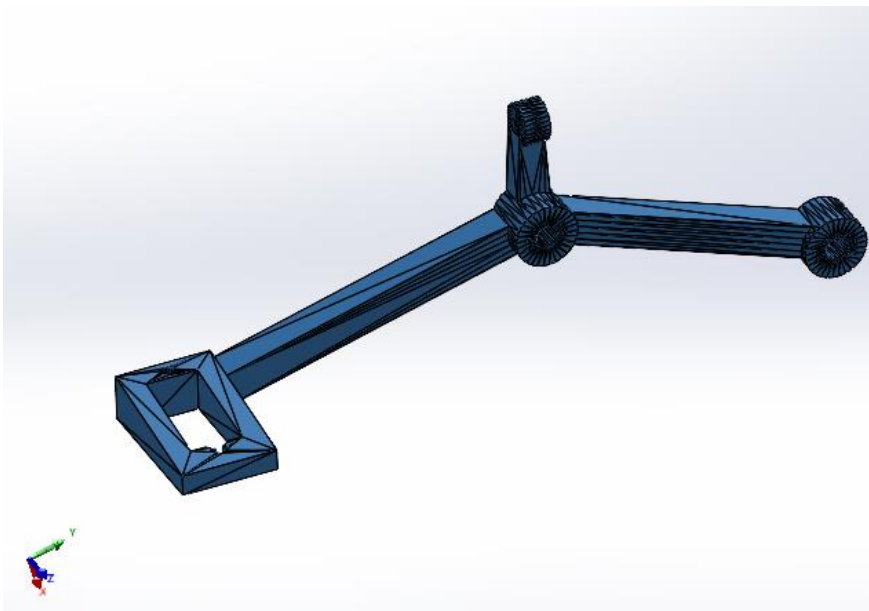


Figura 3.3. Diseño del bogie delantero (Front Bogie).

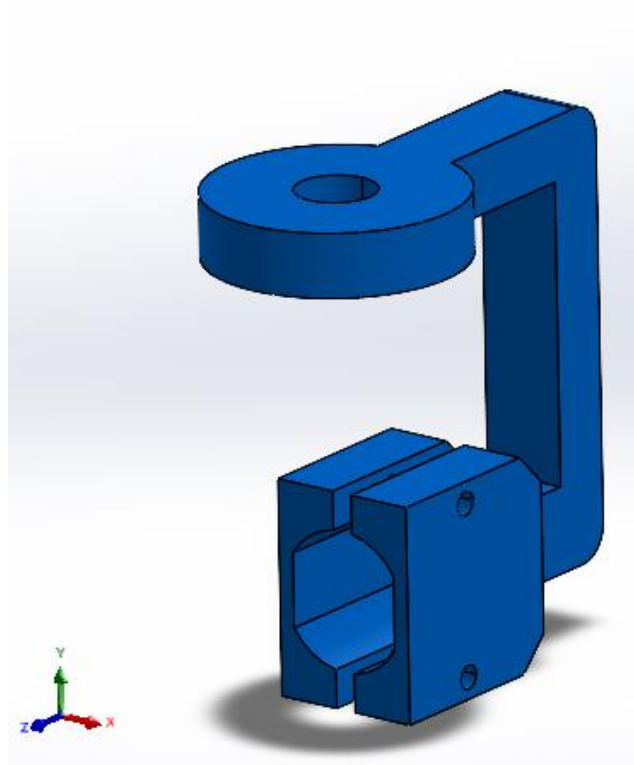


Figura 3.4. Diseño del soporte de las ruedas.

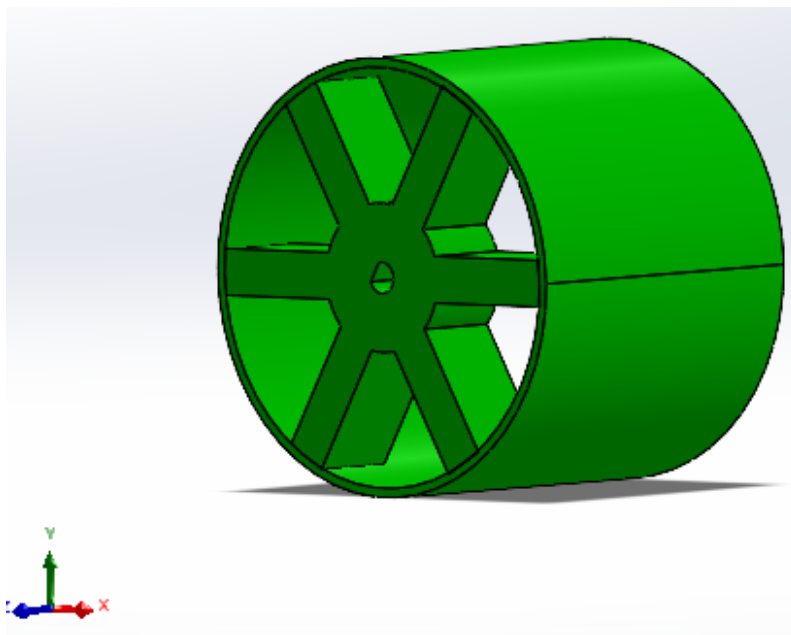


Figura 3.5. Diseño de la rueda.



Figura 3.6. Diseño del neumático.

Además, este diseño tiene una pieza que no tiene ningún otro modelo del Curiosity. Para poder hacer que todas sus ruedas sean directrices, se han modificado los bogies traseros para poder instalar un servomotor extra, permitiendo que todas sus ruedas puedan girar hasta 90 grados, de esta manera, los bogies traseros quedarían de la siguiente forma:

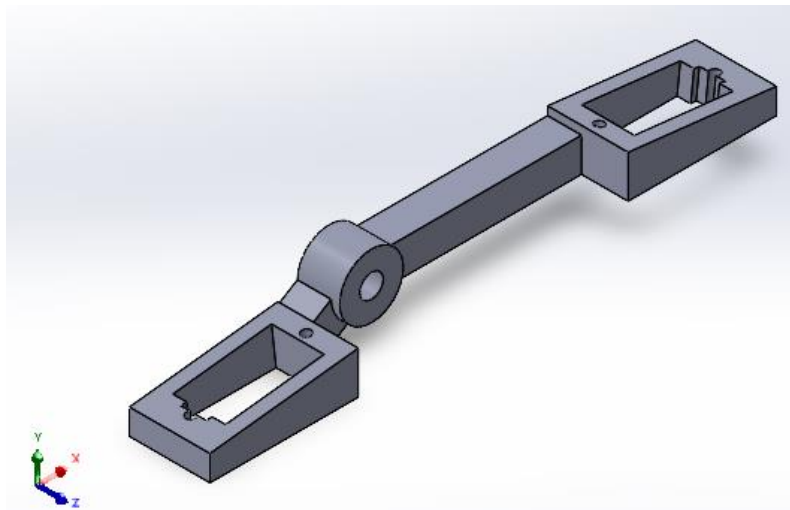


Figura 3.7. Diseño del bogie trasero (Rear Bogie).

4. Simulaciones del modelo

En este apartado de la memoria se va a explicar las simulaciones realizadas en **Simscape Multibody** para estudiar el comportamiento del modelo del Rover Curiosity holonómico.

El primer paso para poder realizar estas simulaciones ha sido realizar el ensamblaje en el entorno de simulación multicuerpo, para ello, se han importado las piezas diseñadas en **SolidWorks** mediante unos bloques llamados *File Solid* y se han ensamblado mediante bloques que simulan una junta de revolución (*Revolute Joint*). Normalmente, un rover Curiosity está formado por un chasis, una barra estabilizadora, dos bogies delanteros, dos bogies traseros, seis ruedas y cuatro servomotores que permiten girar a las ruedas directrices; sin embargo, la finalidad de este trabajo es diseñar un rover que sea capaz de moverse en cualquier dirección, por lo tanto, ha habido que modificar la estructura del Curiosity de tal forma que los bogies traseros sean capaces de alojar dos servos cada uno, en vez del único servo utilizado normalmente. Al permitir que todas las ruedas giren hasta 90° el vehículo es capaz de desplazarse lateralmente, incluso diagonalmente.

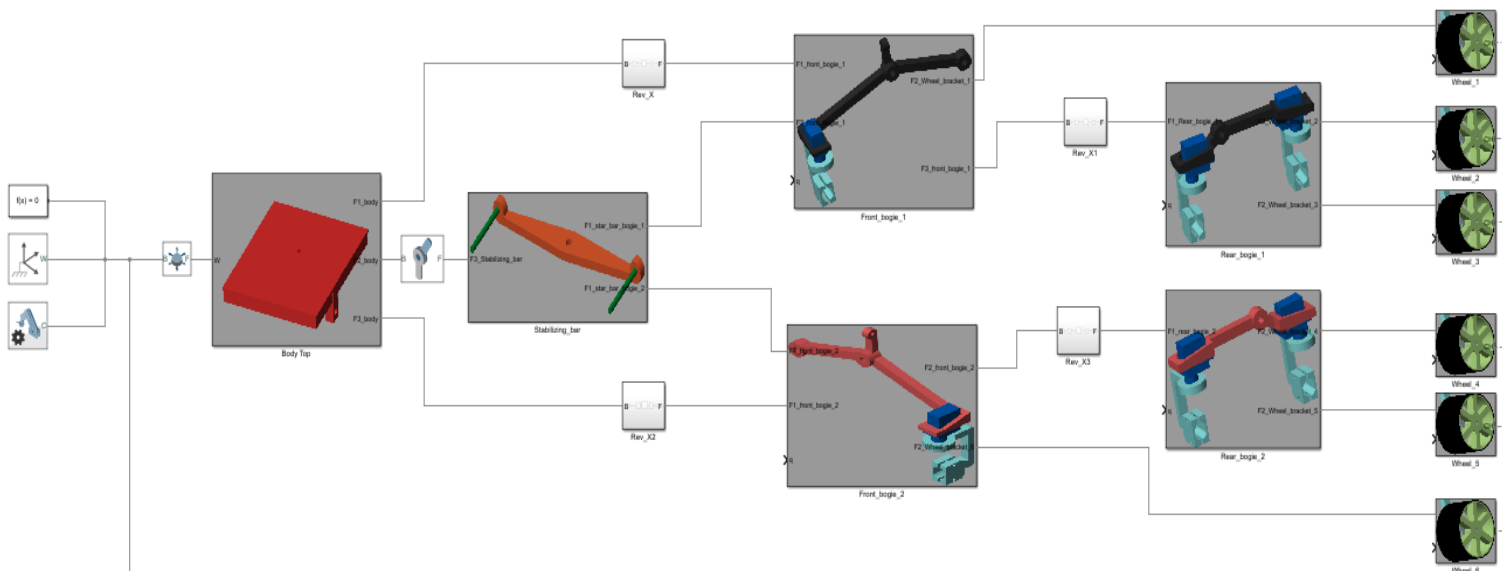


Figura 4.1. Modelo de simulación.

Como se puede observar en la figura 4.1, el modelo de simulación está formado por 7 subsistemas: *Body_Top*, *Stabilizing_Bar*, *Front_Bogie_1*, *Front_Bogie_2*, *Rear_Bogie_1*, *Rear_Bogie_2* y *Wheels*. Las uniones entre cada uno de los subsistemas se realizan mediante articulaciones de rotación (*Revolute Joint*) cuyos coeficientes de rozamiento son tan reducidos que se consideran despreciables, esto sucede con todas las articulaciones del sistema a simular. A continuación, se va a explicar cómo están compuestos cada uno de los subsistemas.

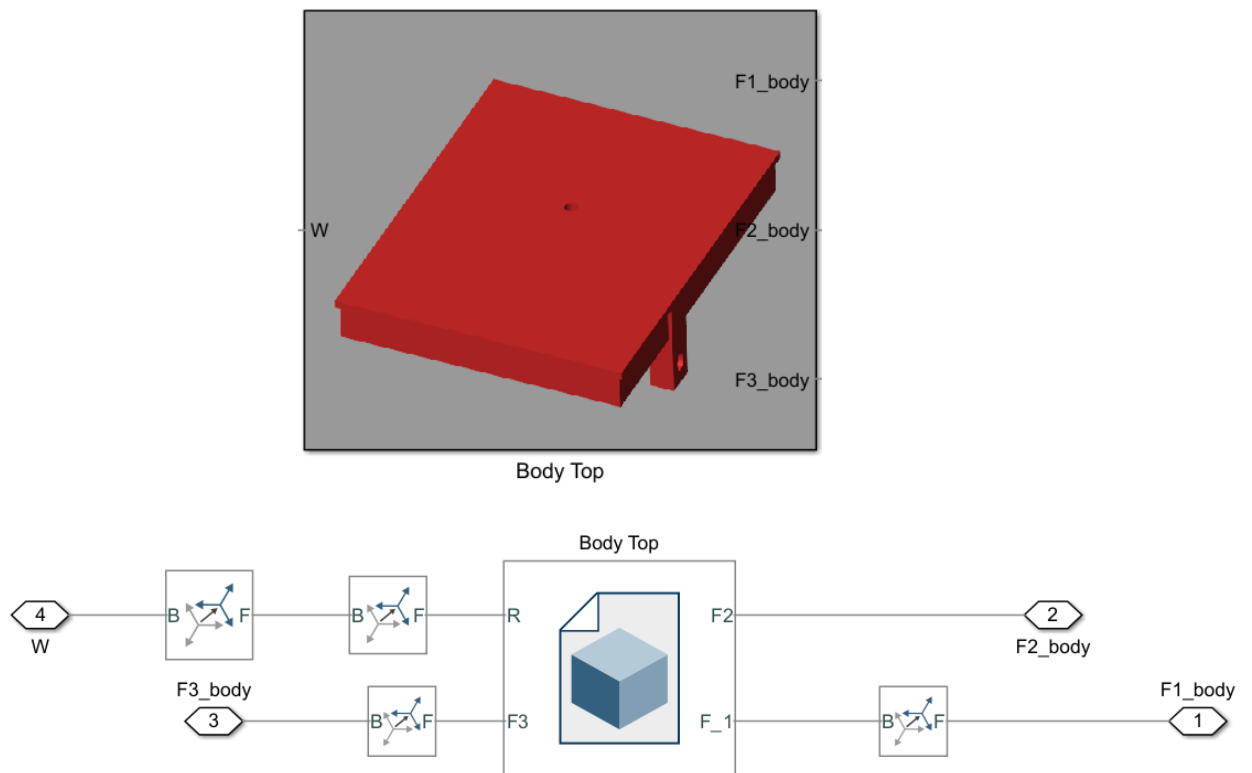


Figura 4.2. Subsistema *Body_Top*.

Este primer subsistema es el chasis del vehículo y el más simple de todos, puesto que solo está compuesto por el sólido diseñado en **SolidWorks** y los bloques de transformación necesarios para que la pieza coincida con las demás piezas, haciendo que sus ejes de unión, *frames*, coincidan permitiendo a las uniones moverse.

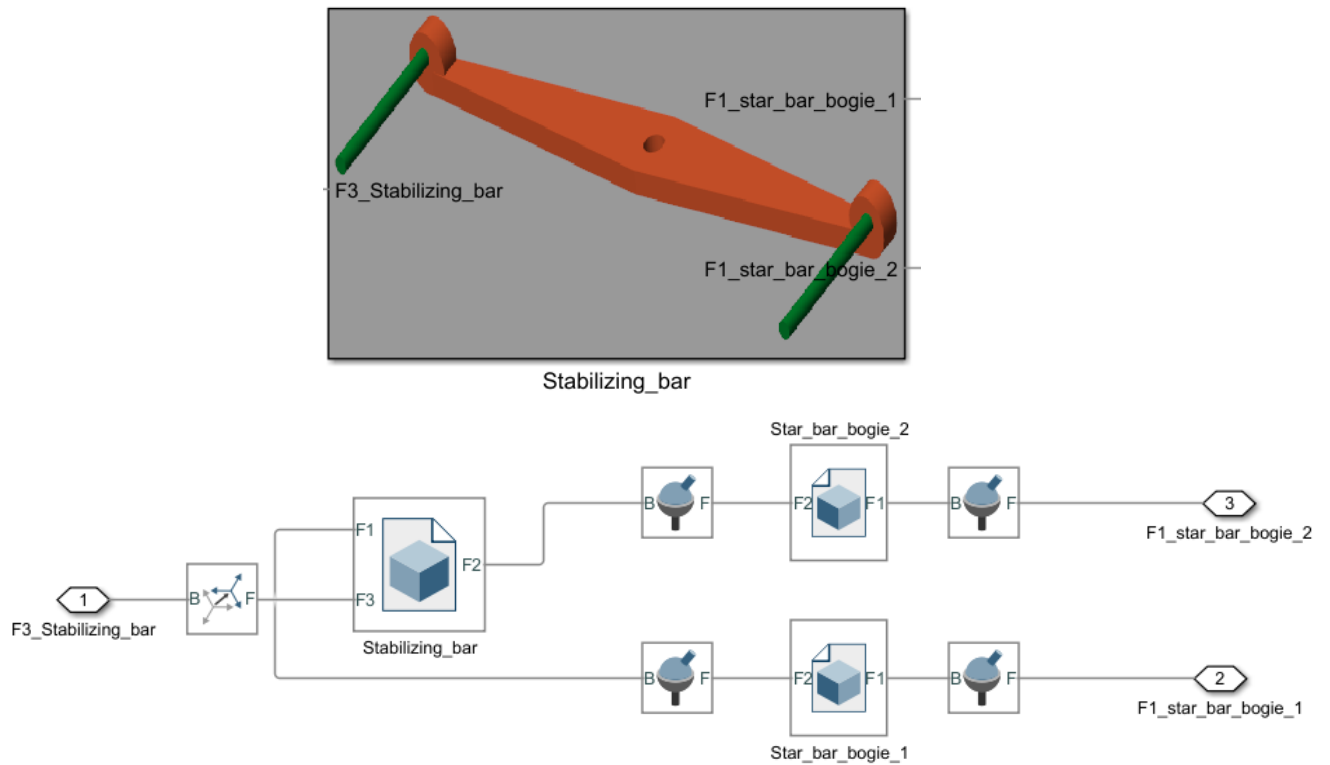


Figura 4.3. Subsistema Stabilizing_Bar.

El siguiente subsistema está formado por la barra estabilizadora del vehículo, la cuál va unida al chasis mediante una junta de revolución, y por dos barras unidas mediante uniones esféricas de tres grados de libertad con la propia barra estabilizadora y con los bogies delanteros, de esta manera, se implementa el sistema de suspensión del rover en el modelo de simulación.

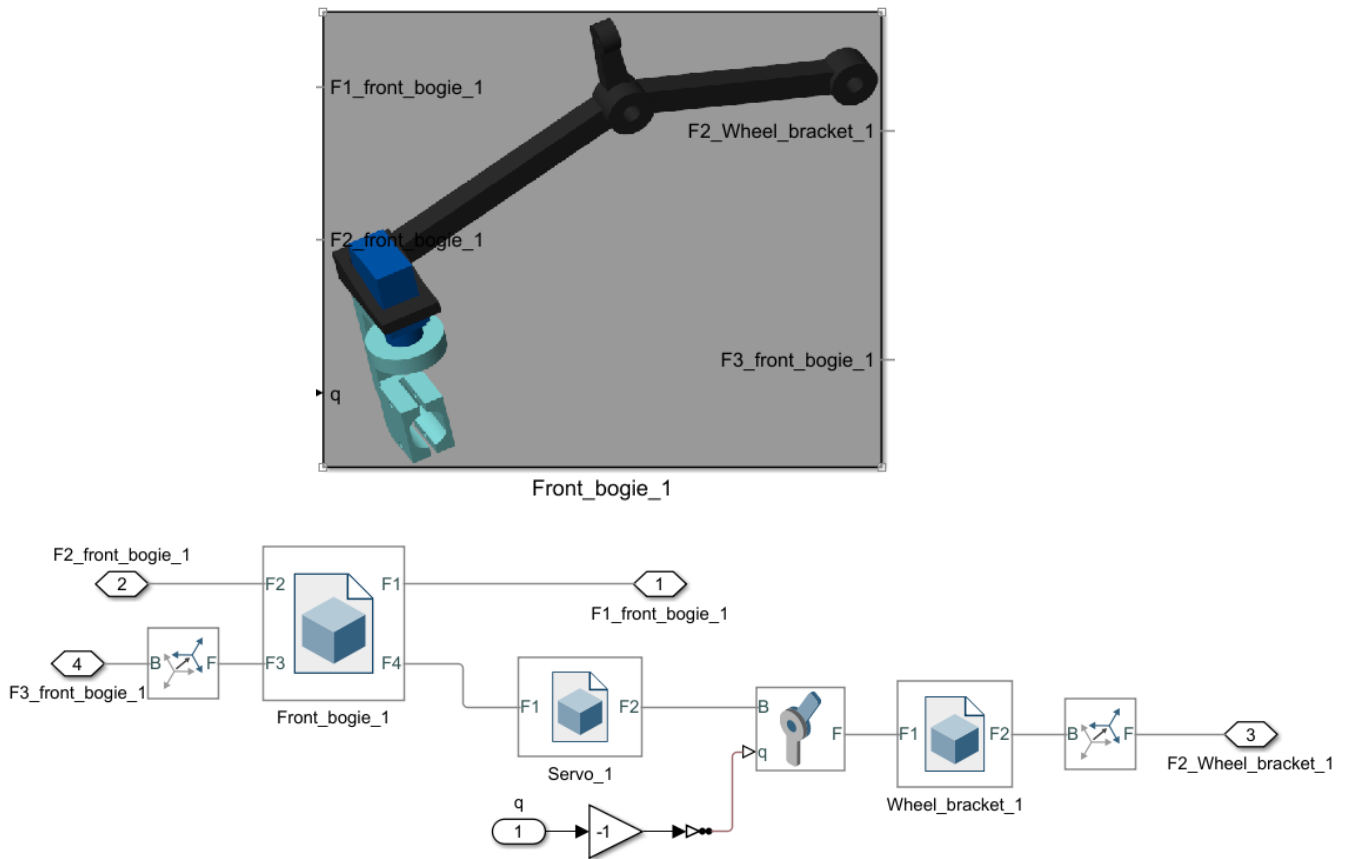


Figura 4.4. Subsistema Front_Bogie.

Los subsistemas de los bogies delanteros están compuestos por la pieza del bogie delantero, unidas al chasis y a la barra estabilizadora. Estas piezas llevan acopladas el modelo del servomotor que se va a utilizar en la implementación real, el cual, está unido al soporte de la rueda mediante una revoluta. Dicha revoluta recibe una señal que le indica la posición que debe tener el servomotor, es decir, hace girar al soporte de la rueda los grados indicados por la señal configurada.

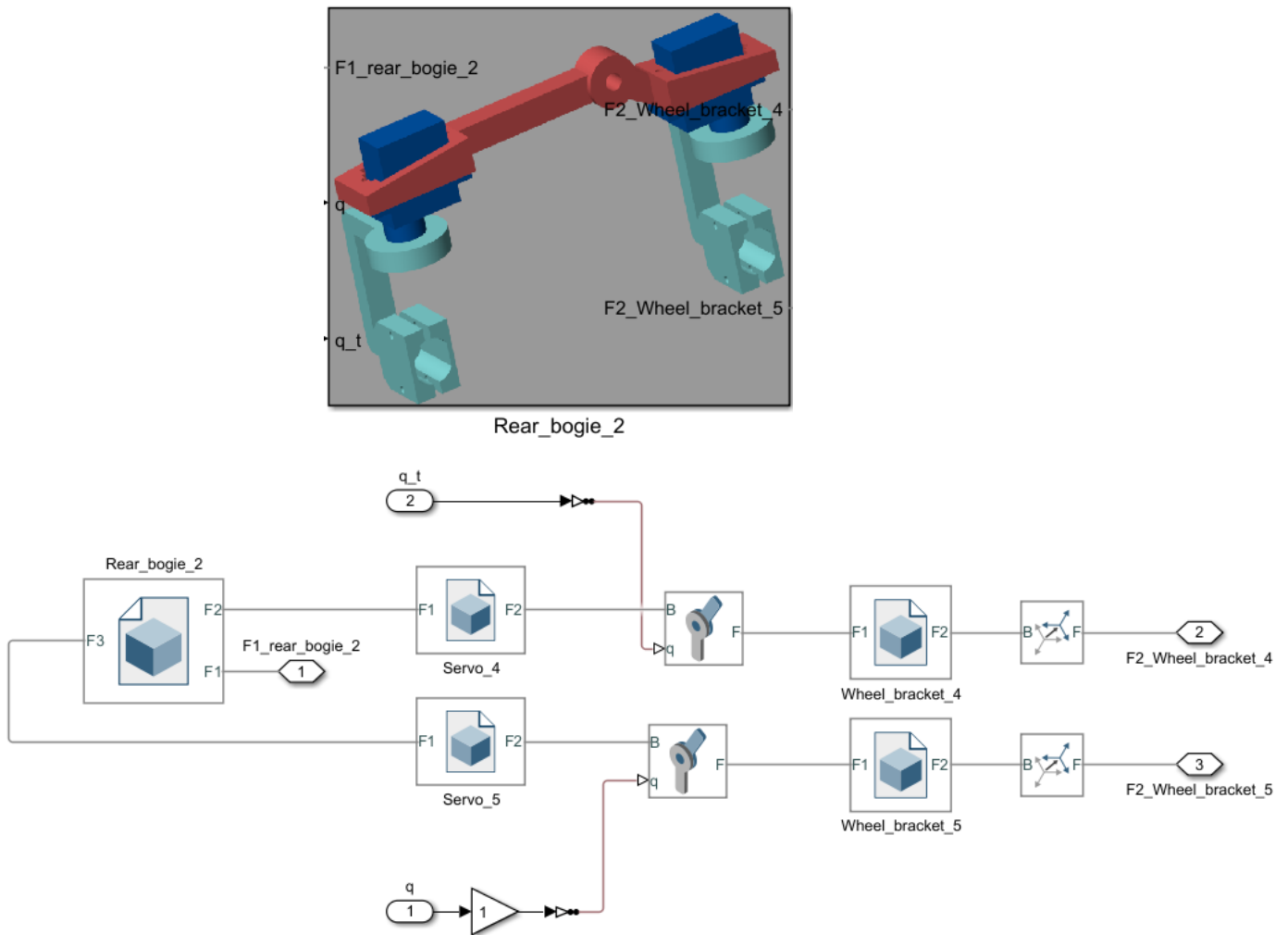


Figura 4.5. Subsistema Rear_Bogie.

Como se muestra en la imagen anterior, los subsistemas de los bogies traseros son bastante similares a los delanteras, sin embargo, hay que tener en cuenta que los bogies traseros llevan dos servomotores y dos soportes para las ruedas. Esto se debe a que son la estructura que a la que van unidas las dos de las tres ruedas de cada lado del vehículo. Cada una de las uniones de revolución de los servos traseros reciben una señal de entrada diferente, indicándoles así la posición de giro de las ruedas.

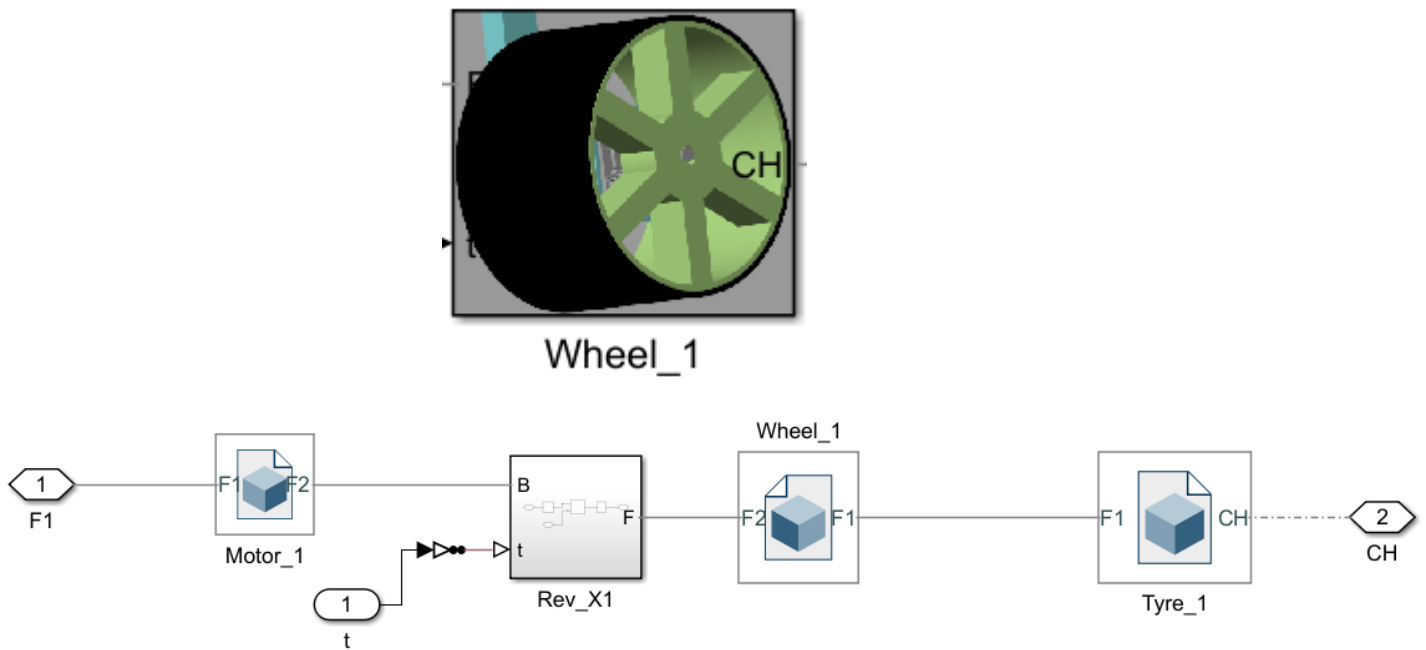


Figura 4.6. Subsistema Wheel.

El último de los subsistemas es el de las ruedas. Este subsistema está formado por el modelo del motor que hará girar la rueda, unido mediante una junta de revolución al sólido creado de la rueda, la cuál, va directamente unida a la llanta. La junta de revolución es una revoluta que gira entorno al eje X con el par introducido mediante una señal de entrada configurada.

Una vez tenemos el modelo ensamblado correctamente y se ha comprobado que todas sus uniones móviles giran, el siguiente paso antes de realizar las distintas simulaciones es crear las distintas señales que van a recibir tanto las revolutas de los servos como las de los motores. Para ello se ha utilizado el bloque *Signal Builder*, que nos permite crear varias señales cuadradas distintas, y varias ganancias que nos permiten indicar el par del motor y los grados de la posición de los servos, hay que tener en cuenta que **Simscape Multibody** trabaja en radianes así que habrá que añadir bloques *D2R (Degrees to Radians)* y que en realidad los servomotores no son capaces de realizar cambios bruscos de posición, así que se añadirán unos bloques de funciones de transferencia que suavicen las señales cuadradas.

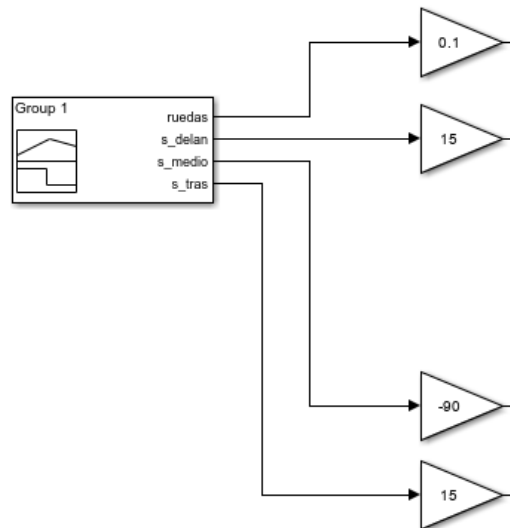


Figura 4.7. Bloque *Signal Builder* y ganancias de las señales.

Se han utilizado cuatro señales distintas, puesto que una de ellas es la del par del motor de las ruedas y las otras tres restantes se utilizan para indicar la posición de los servomotores de cada una de las filas de ruedas. Después de probar muchas configuraciones para simular los servomotores, se alcanzó la conclusión de que era mejor tener una señal para cada una de las filas de ruedas debido a que esta configuración permite girar cada una de las filas de manera independiente, lo que dota al vehículo de una mayor movilidad, puesto que, a diferencia de con otras configuraciones, permite al vehículo desplazarse tanto lateral como diagonalmente en la misma simulación, sin tener que modificar las señales.

Por último, se han configurado las fuerzas de contacto entre las ruedas y el suelo. Esta configuración se realiza mediante los bloques *Spatial Contact Force*, unidos al suelo y a cada una de las ruedas, indicando el valor de cada uno de los siguientes parámetros:

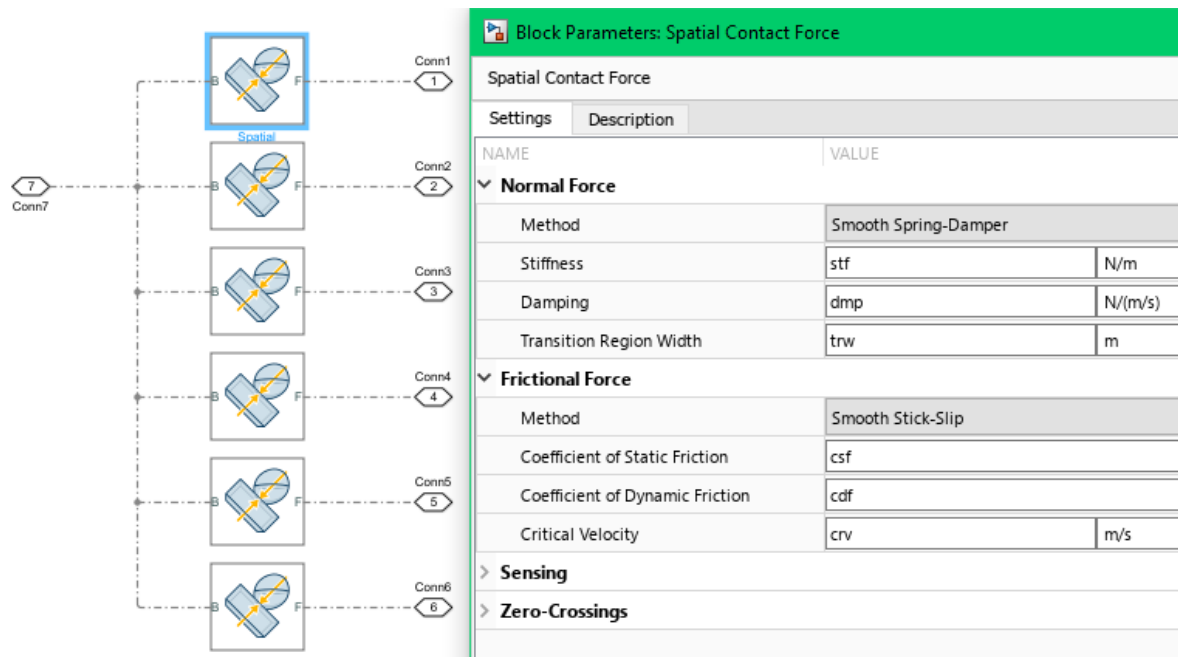


Figura 4.8. Bloques *Spatial Contact Force*.

En el parámetro de la rigidez (*stiffness*) se han introducido 20.000 N/m, en el amortiguamiento (*damping*) se han utilizado 25 N/(m/s) y en el ancho de la región de transición (*transition region width*) se han indicado 0,0001 m. Dichos parámetros fueron determinados mediante una simulación en la que se deja caer vehículo desde cierta distancia para estudiar su comportamiento.

En cuanto a los parámetros de la fuerza de fricción, se ha supuesto que el vehículo se desplaza sobre cemento usado. Por lo tanto, se han utilizado los coeficientes de fricción de la goma sobre el cemento, siendo estos: coeficiente de fricción estático (*coefficient of static friction*) igual a 0,6 y coeficiente de fricción dinámico (*coefficient of dynamic friction*) igual a 0,5. Por último, se ha establecido que la velocidad crítica (*critical velocity*) sea de 0,001 m/s.

Ahora que ya se ha montado el ensamblaje del modelo y se han configurado tanto las señales del movimiento como los parámetros de las fuerzas de contacto, se puede empezar a realizar las distintas simulaciones. Se han realizado 4 simulaciones distintas en diferentes escenarios y situaciones. A continuación, se van a explicar cada una de las simulaciones.

4.1 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER

La primera simulación es la más básica de todas las realizadas, en ella, se coloca el rover sobre el suelo y se introducen varias señales en las ruedas para hacer que el vehículo se

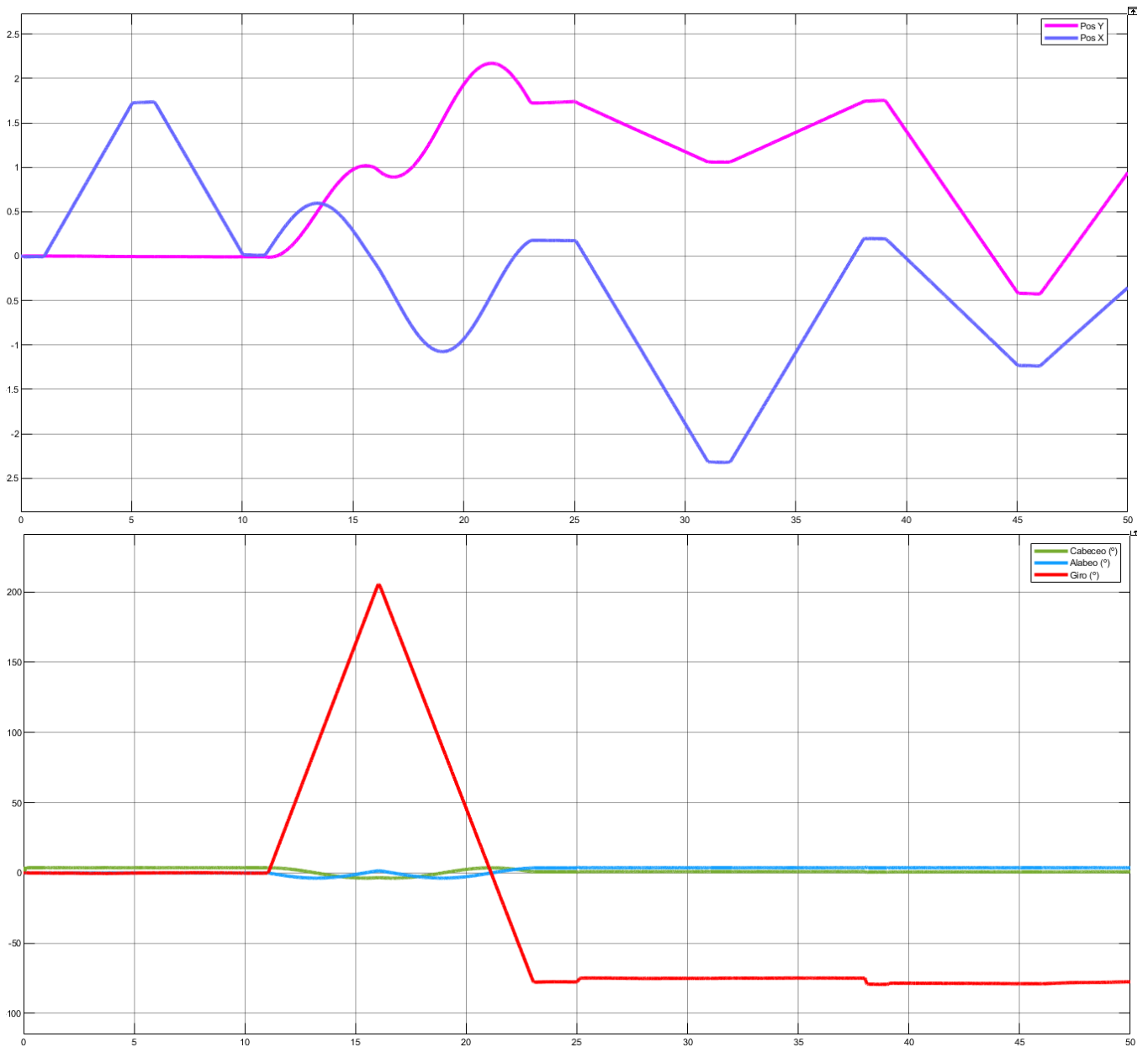


Figura 4.11. Gráficas de la Simulación 1.

La primera gráfica se corresponde con la posición en X y en Y del rover, en ella se puede observar que el vehículo primero se desplaza hacia adelante y hacia atrás en el eje X (se incrementa y decrementa la gráfica morada), para pasar a realizar giros en ambas direcciones (partes senoidales de las gráficas) y desplazarse lateralmente y en diagonal. Mientras, la segunda gráfica muestra el cabeceo o giro en torno al eje Y (verde), el alabeo o giro en torno al eje X (azul) y el giro en torno al eje Z (rojo). Puesto que el rover se desplaza por una superficie completamente plana, el cabeceo y el alabeo es prácticamente nulo; sin embargo, se puede apreciar perfectamente los momentos en los que gira el vehículo.

4.2. SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER CON RAMPAS

La segunda simulación consiste en observar el comportamiento del rover Curiosity al subir una serie de rampas consecutivas, algunas de ellas con una caída repentina. Esta simulación nos permite comprobar si el par de las ruedas es suficiente para escalar pendientes y si el diseño de la suspensión del rover le permite recuperarse al caer desde un pequeño escalón. En la figura 4.12 se puede observar como, gracias a su sistema de suspensión rocker-bogie, el rover es capaz de mantener sus seis ruedas en contacto con el suelo al bajar un escalón.

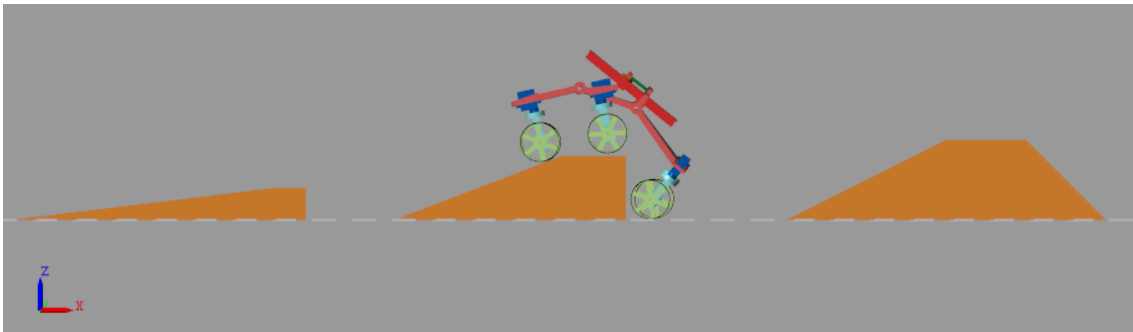


Figura 4.12. Simulación 2: Rampas.

En las gráficas obtenidas se puede apreciar que la trayectoria del vehículo es bastante estable, a pesar de las perturbaciones de las rampas. Además, si observamos el cabeceo (gráfica verde) que se produce en el rover, se puede intuir perfectamente los momentos en los que este se encuentra subiendo o bajando una rampa.

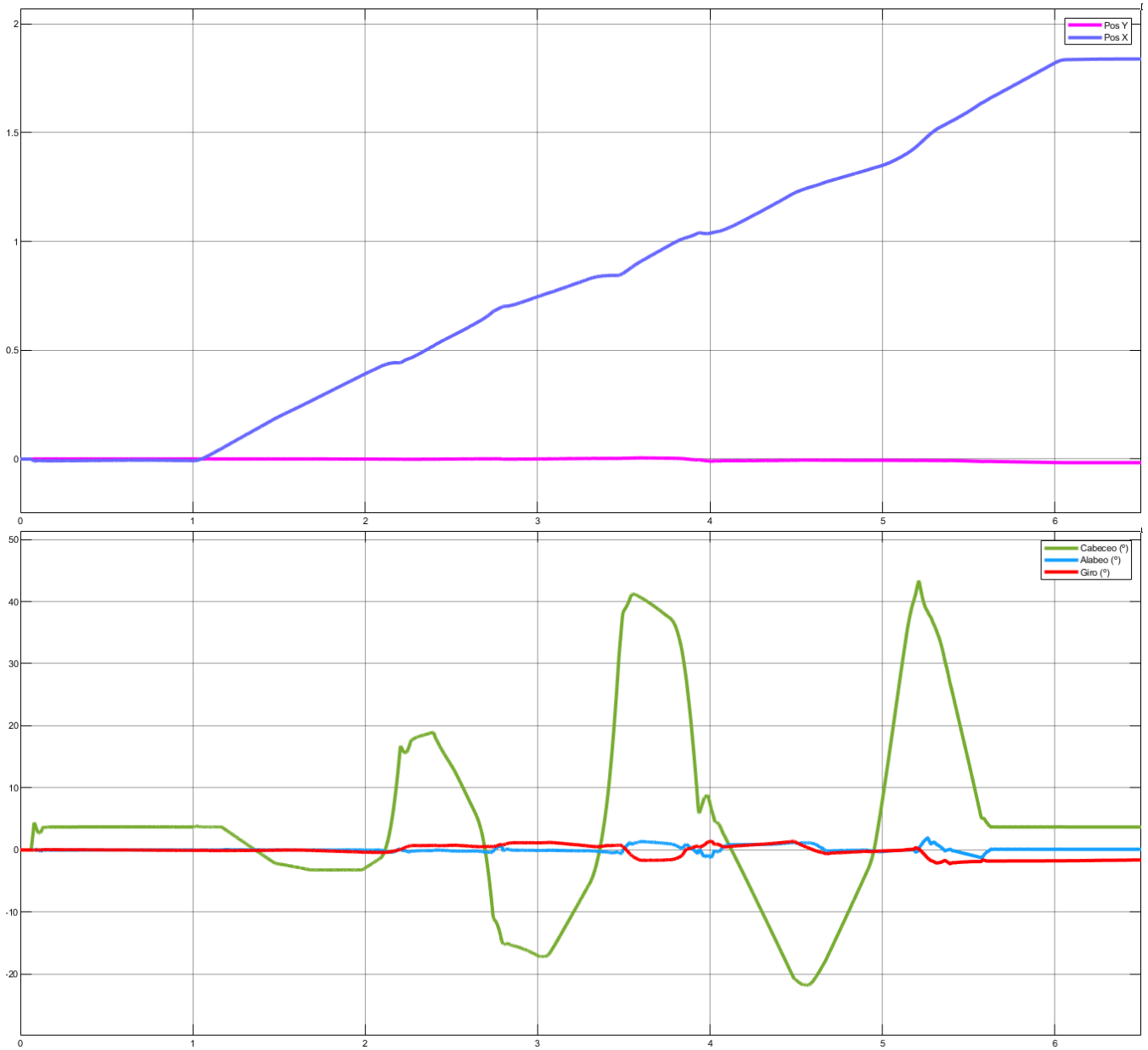


Figura 4.13. Gráficas de la Simulación 2.

4.3 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER SUBIENDO ESCALONES

La siguiente simulación es una variación de la anterior, en ella el rover debe de ascender por una pendiente escalonada. De esta manera, se comprueba que el diseño mantiene una de las principales características del rover Curiosity: la capacidad de salvar distintos obstáculos.

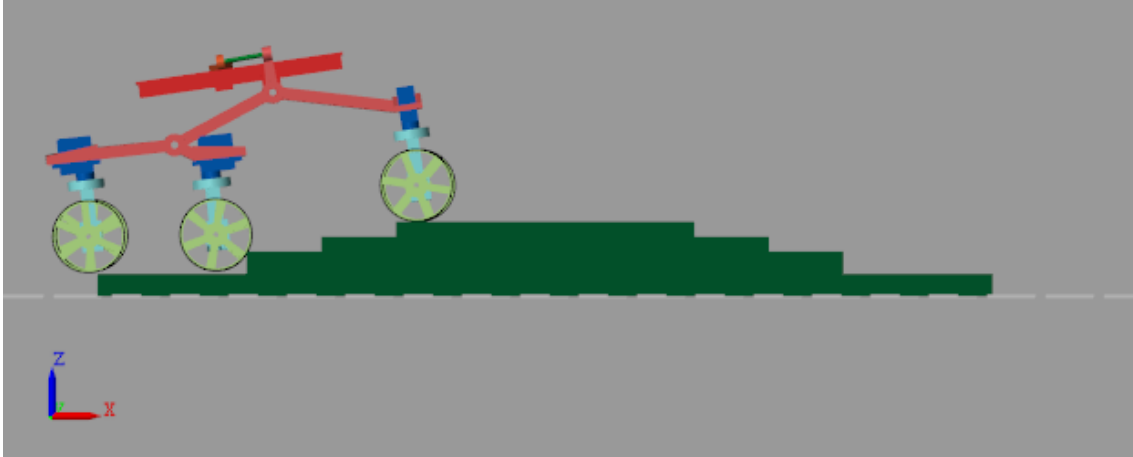


Figura 4.14. Simulación 3: Escalones.

En las gráficas de esta simulación se puede apreciar que el vehículo sigue manteniendo su trayectoria hacia delante en el eje X (gráfica morada) sin que los escalones sean capaces de desviarla. Por otra parte, al centrarse en la segunda gráfica, se muestra que el rover cabecea (gráfica verde) menos al subir los escalones que al ascender por las rampas.

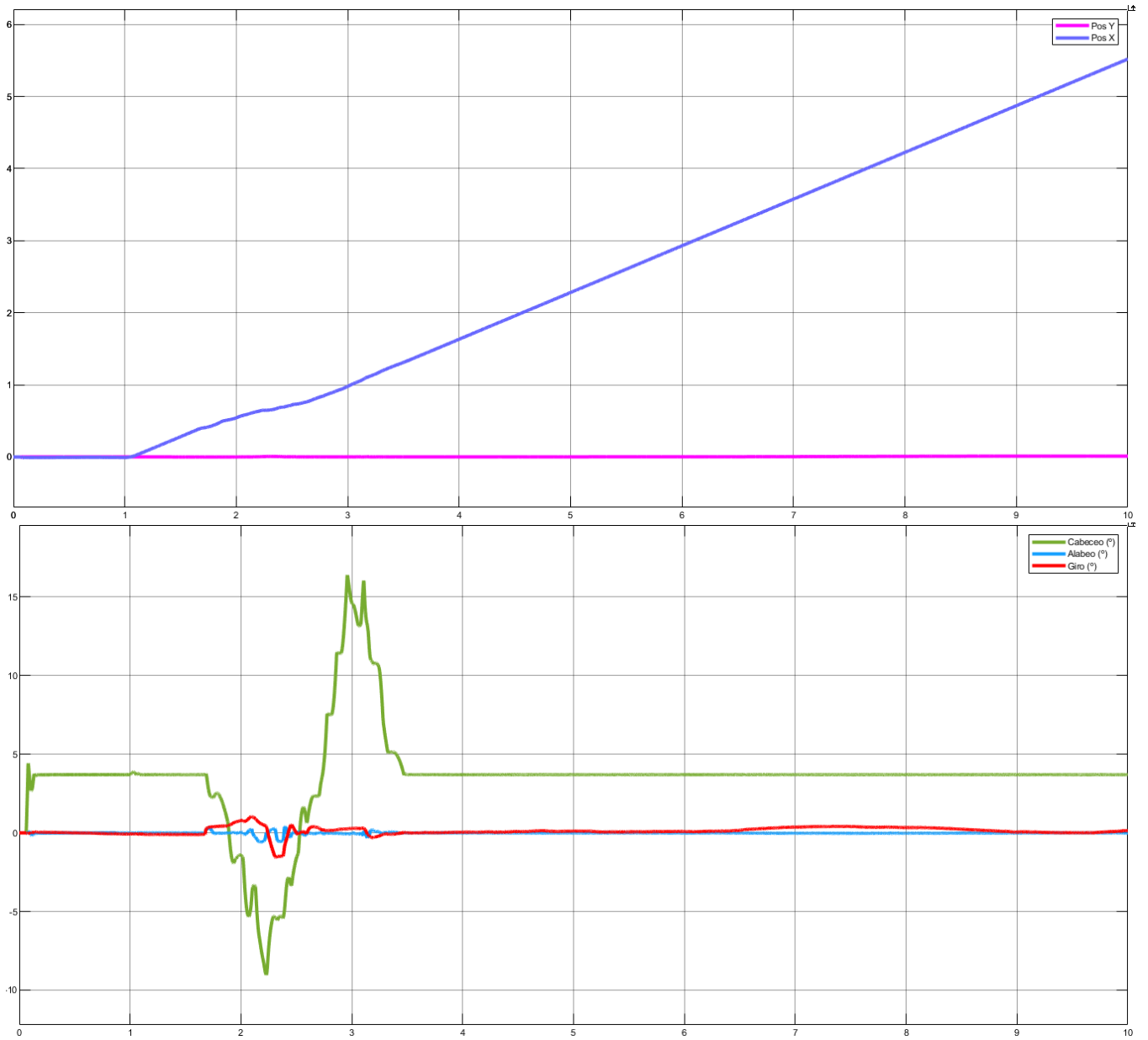


Figura 4.15. Gráficas de la Simulación 3.

4.4 SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL ROVER EN UNA PISTA DE OBSTÁCULOS

La última de las simulaciones realizadas consiste en hacer que el rover Curiosity realice distintos tipos de desplazamientos dentro de una pista con diversos obstáculos. En dicha pista de obstáculos, el rover debe de superar obstáculos por uno de sus lados, así como, ascender rampas mediante un desplazamiento lateral y con una trayectoria diagonal.

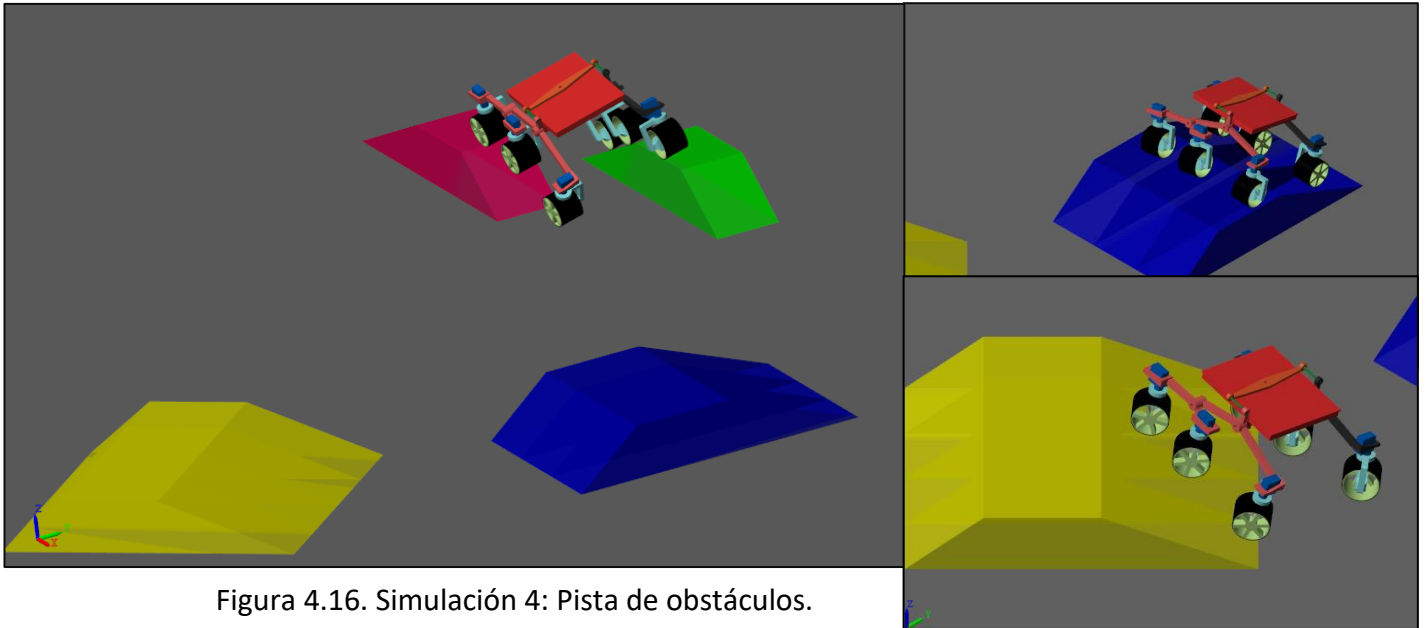


Figura 4.16. Simulación 4: Pista de obstáculos.

En esta simulación se ha añadido una variación con respecto a las demás, se ha realizado una segunda simulación en la que la barra estabilizadora del rover se encontraba bloqueada, de esta forma, se ha podido comprobar la importancia de dicha pieza a la hora de enfrentarse a los distintos obstáculos.

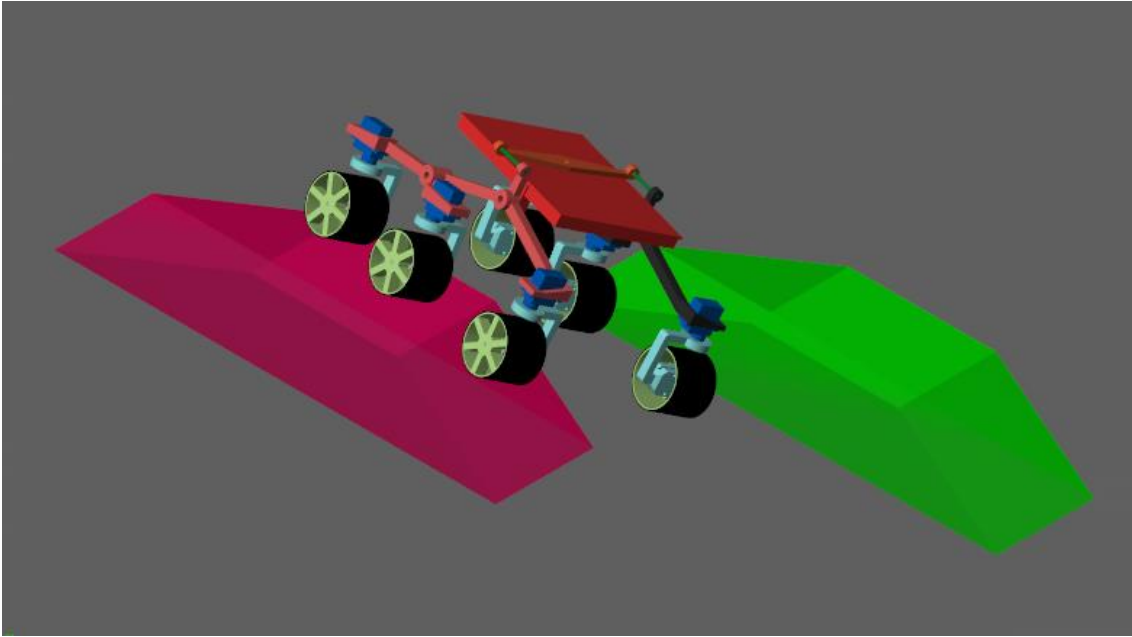


Figura 4.17. Simulación 4 sin barra estabilizadora.

Al realizar la simulación con la barra estabilizadora del rover bloqueada se puede observar que al vehículo le es muy complicado salvar los obstáculos, a diferencia de cuando lo hace con la barra estabilizadora operativa, y que es incapaz de mantener la trayectoria.

Si comparamos las gráficas de ambas simulaciones, se puede apreciar mejor que en la primera simulación (figura 4.18) el vehículo mantiene la trayectoria que debía de seguir sin que sea perturbada por los obstáculos. Sin embargo, en la gráfica de la segunda simulación (figura 4.19) se observa que el rover, cuando se enfrenta a los obstáculos sin la barra estabilizadora, es incapaz de mantener la trayectoria y traza una completamente distinta a la que se suponía que debía de seguir.

Por otra parte, se aprecia que el rover produce un alabeo (gráfica azul) y un cabeceo (gráfica verde) menor cuando no utiliza la barra estabilizadora. Esto se debe a que el vehículo no se inclina para superar los obstáculos, manteniendo la mayor parte del tiempo las seis ruedas en contacto con alguna superficie, si no que la mitad del cuerpo del vehículo se mantiene en el aire a la hora de salvar un obstáculo. El hecho de que una parte del vehículo se mantenga tanto tiempo en el aire supone una gran desventaja al comparar las simulaciones, puesto que lo vuelve muy inestable.

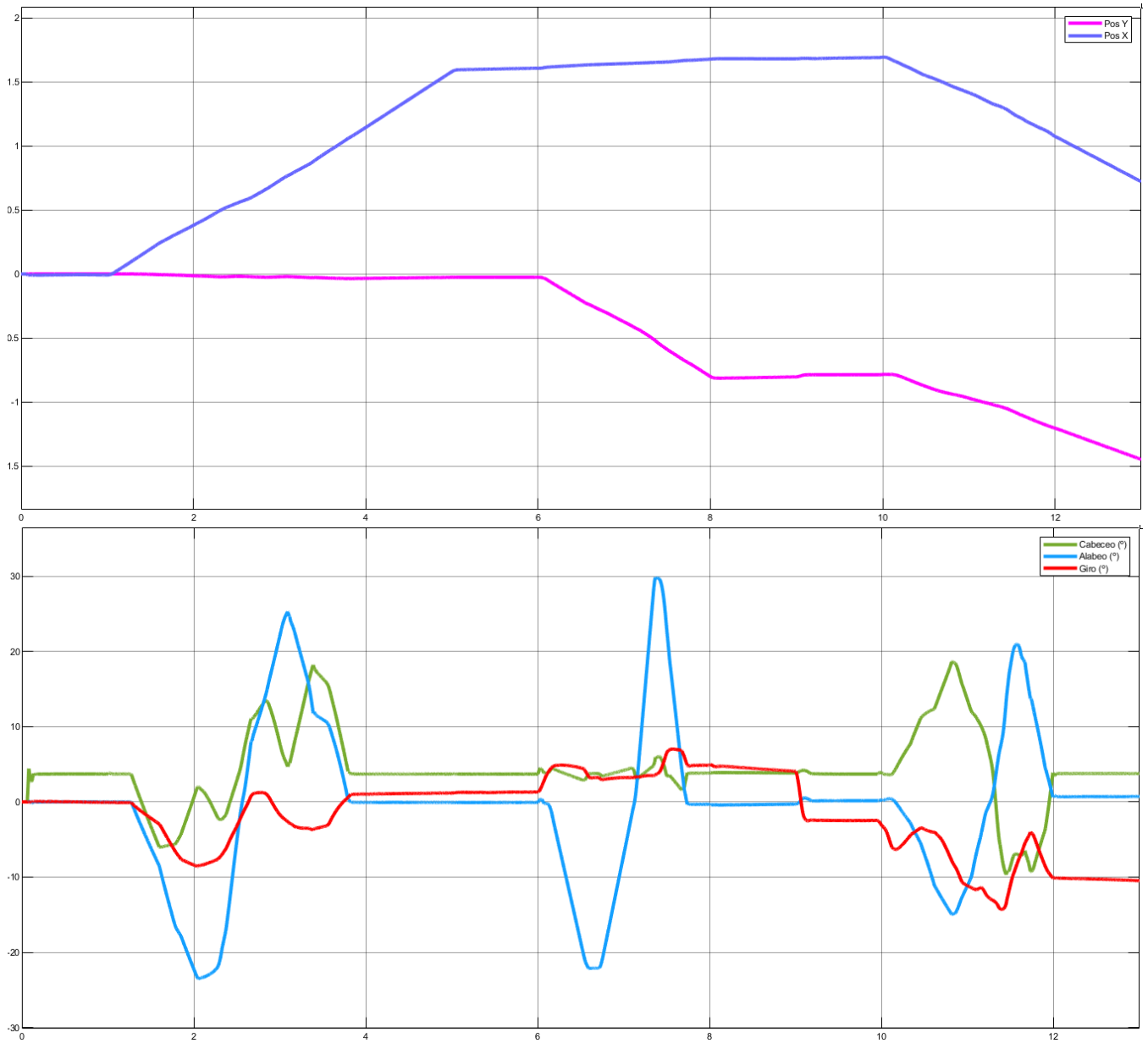


Figura 4.18. Gráficas de la Simulación 4.

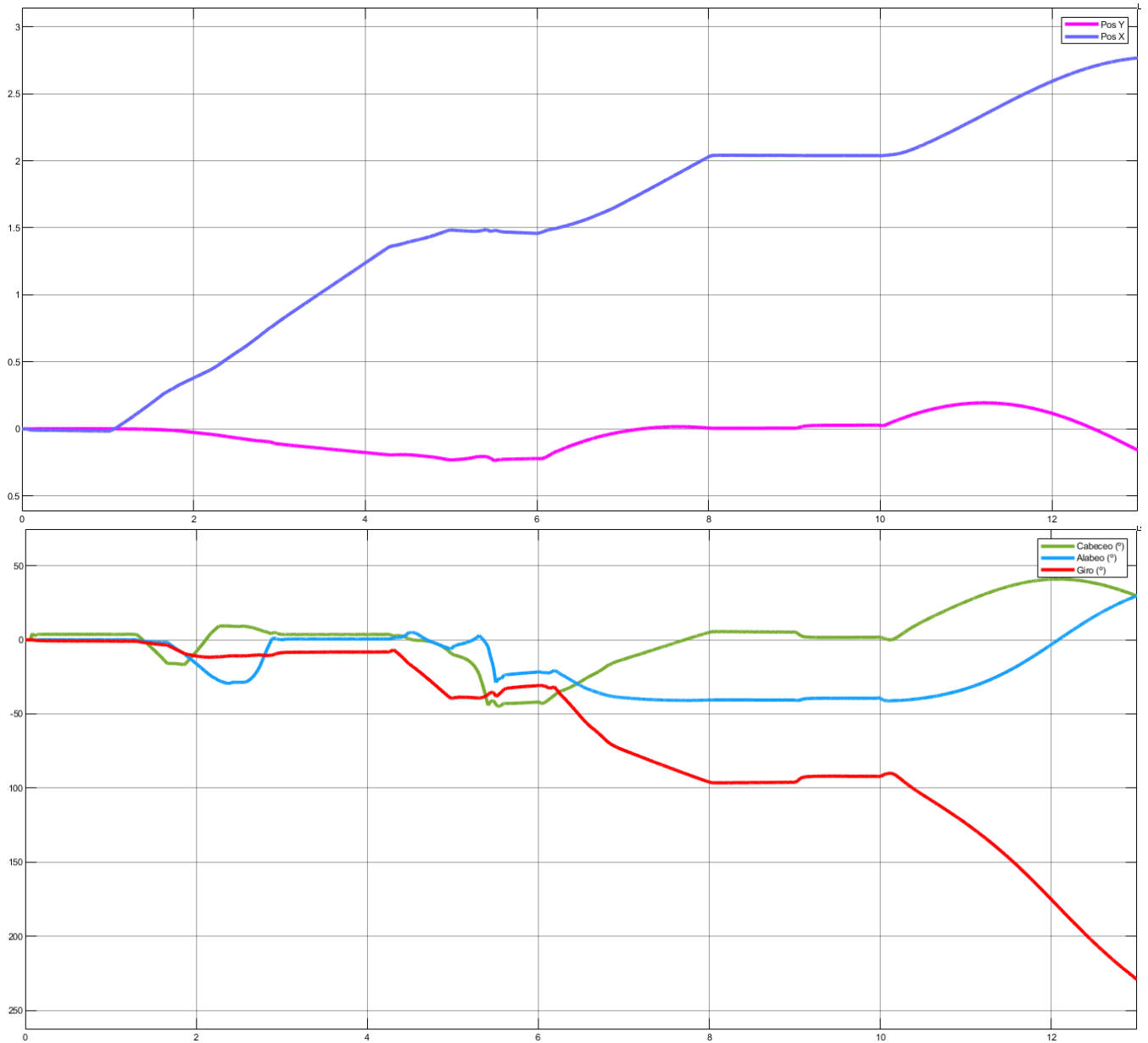


Figura 4.19. Gráficas de la Simulación 4 sin barra estabilizadora.

5. Implementación del modelo

En este último capítulo se van a detallar los componentes utilizados para la implementación real del modelo a escala planteado, así como, el proceso de construcción del rover Curiosity desarrollado a lo largo de esta memoria.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS

Para la implementación del diseño del Curiosity se utilizaron varios elementos, a continuación, se van a mostrar y detallar los utilizados para la programación del movimiento del vehículo.

5.1.1 Placa ELEGOO MEGA 2560 R3

El elemento más importante de todo el montaje del modelo a escala es el microcontrolador, puesto que este será el encargado de alimentar y de controlar al resto de los elementos que componen al prototipo. Para esta implementación se ha escogido una **placa ELEGOO MEGA 2560 R3** cuyas especificaciones técnicas, mostradas en la tabla 5.1, la convierten en una buena opción para proyectos complejos como el que se ha llevado a cabo en este trabajo fin de máster.

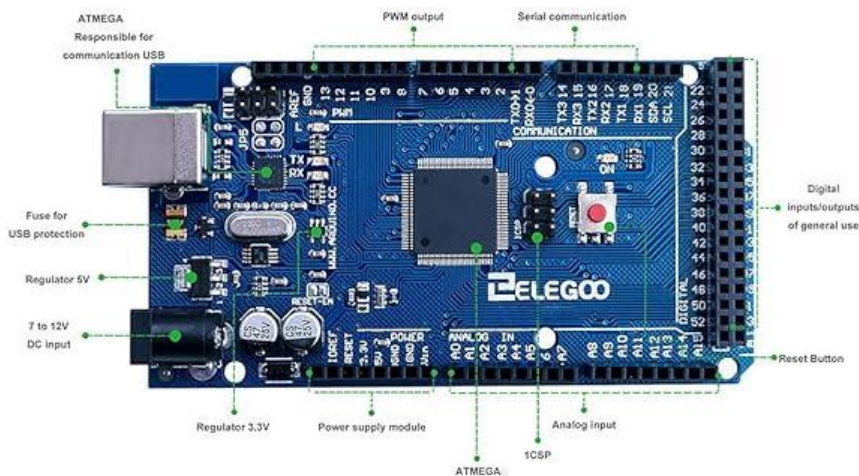


Figura 5.1. Placa ELEGOO Mega 2560 R3.

Marca	ELEGOO
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5 V
Tensión de entrada	7-9 V
Pines Digitales E/S	54
Pines PWM	15
Entradas Analógicas	16
Corriente por pin E/S	40 mA
Comunicación UART	4 pines
Comunicación I2C	Sí
Comunicación SPI	Sí
Dimensiones	101,5 x 53,3 mm
Peso	34 g

Tabla 5.1. Especificaciones técnicas ELEGOO MEGA 2560 R3.

Además, este modelo de microcontrolador es muy práctico puesto que se puede alimentar mediante la entrada USB de la placa o con una fuente de alimentación externa como una batería recargable de 9V. [15]

5.1.2 Módulo Controlador de Servos PCA9685

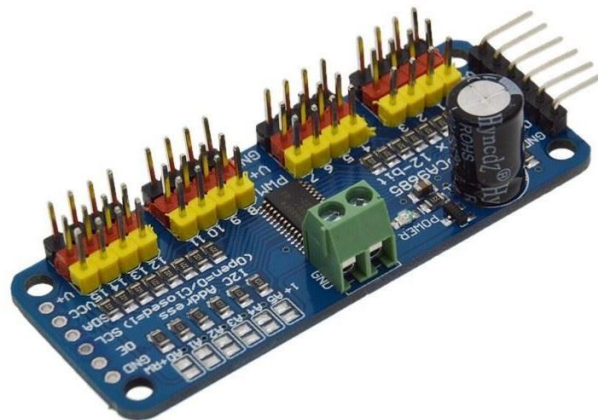


Figura 5.2. Módulo PCA985.

El **módulo PCA9685** escogido para este proyecto es un controlador de 16 canales PWM de 12 bits que nos permite controlar los seis servos que se van a utilizar en este modelo de rover Curiosity. El módulo utiliza la comunicación I2C para establecer la conexión con la placa y tiene las siguientes características técnicas. [16]

Pines de control I2C	6
Canales PWM	16
Resolución por canal	12 bits
Tensión PWM máxima	6 V
Frecuencia de salida	40-1000 Hz
Tensión de entrada	3-5 V
Dimensiones	62,3 x 25,3 mm
Peso	5,5 g

Tabla 5.2. Especificaciones técnicas Módulo PCA9685.

5.1.3 Driver L9110

Para controlar los motores que van a hacer girar las ruedas del vehículo se van a utilizar tres Módulos de Puento en H L9110, también conocidos como **Drivers L9110**. Dichos drivers son capaces de controlar dos motores de manera independiente.

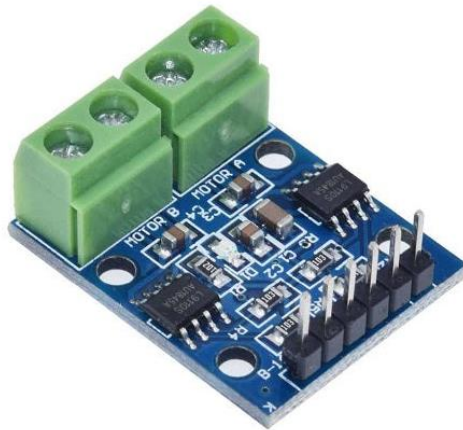


Figura 5.3. Driver L9110.

Se ha escogido este tipo de controlador debido a que, a diferencia de otros, este solo utiliza una única fuente que sirve para alimentar y controlar los motores a controlar. A continuación, se muestran las especificaciones técnicas de este componente. [17]

Tensión de operación	2,5-12 V
Corriente de operación (por canal)	800 mA
Dimensiones	30 x 23 mm

Tabla 5.3. Especificaciones técnicas Driver L9110.

5.1.4 Micro Servo MG90s

Para cambiar la posición de las ruedas del vehículo se necesitan unos servomotores de pequeño tamaño y de bajo par, por ello se han seleccionado los **servos MG90s**. Estos micro servomotores son capaces de trabajar en Arduino y, además, son compatibles con el módulo controlador comentado anteriormente, con las siguientes especificaciones técnicas. [18]



Figura 5.4. Servo MG90s.

Tensión	4,8-6 V
Corriente	550 mA
Par de parada a 4,8V	1,8 kgcm
Velocidad a 4,8V	0,1 s / 60º
Ángulo de giro	180 º
Dimensiones	22 x 11,5 x 27 mm
Peso	13,4 g

Tabla 5.4. Especificaciones técnicas Servo MG90s.

5.1.5 Motor de Engranajes Micro DC N20

Los últimos componentes electrónicos que cabe destacar son los motores que hacen girar a las ruedas del rover. En esta situación se han elegido los motores **micro DC N20**, puesto a que poseen una caja reductora con engranajes de metal que le permiten alcanzar un buen par a pesar de su reducido tamaño.



Figura 5.5. Motor Micro DC N20.

Estos motores son una muy buena opción para aplicaciones electrónicas del tipo del modelo del rover Curiosity que se ha llevado a cabo en este proyecto debido principalmente, a sus características técnicas.

Tensión de operación	3-12 V
Corriente a 12V	150 mA
Velocidad de rotación (a 12V)	100 rpm
Par motor a 12V	2 kgcm
Par de bloqueo a 12V	16 kgcm
Dimensiones	24 x 10x 12 mm
Peso	15 g

Tabla 5.5. Especificaciones técnicas Micro DC N20.

5.2 MONTAJE DEL MODELO

En este apartado se pretende mostrar el procedimiento que se ha seguido a la hora de implementar el modelo diseñado con anterioridad. Para ello, lo primero que se ha realizado es la comprobación y programación de todos los componentes listados anteriormente.

Se han probado que todos los componentes funcionasen independientemente antes de proceder a montarlos en el modelo final, debido a que, de esta manera es más fácil identificar si alguno de ellos es defectuoso y sustituirlo. En el caso de probarlos directamente sobre el modelo implementado, sería muy difícil sustituir los elementos dañados.

Los primeros componentes que han sido probados son los seis servomotores y su placa controladora. Con esta finalidad se han conectado los servos siguiendo el siguiente esquema:

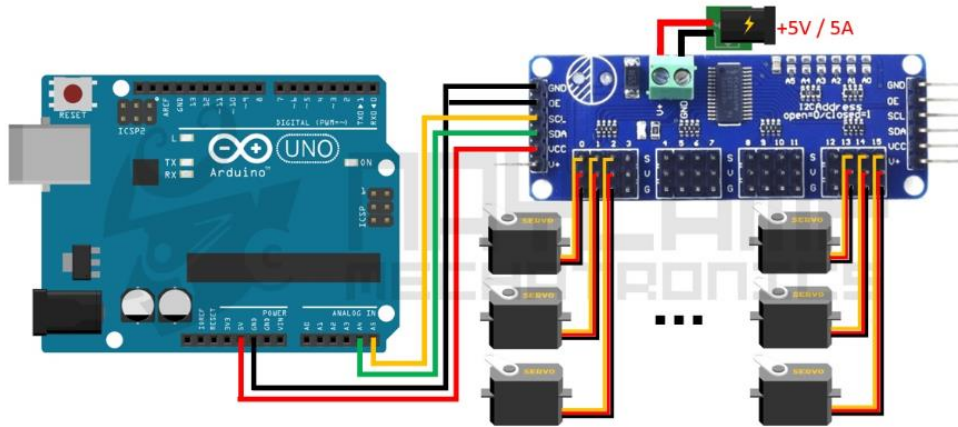


Figura 5.6. Esquema de conexión de los servomotores.

Para alimentar el *módulo PCA9685* se han utilizado cuatro pilas alcalinas de 1,5V montadas en un portapilas como el de la figura 5.7, el cuál se conecta a los puertos de alimentación del módulo.



Figura 5.7. Portapilas de 4x1,5V.

Una vez que se han probado los servos, lo siguiente en probar han sido los motores. Para poder probar los motores, se han conectado cada dos motores *Micro DC N20* a un *driver L9110* siguiendo el siguiente esquema:

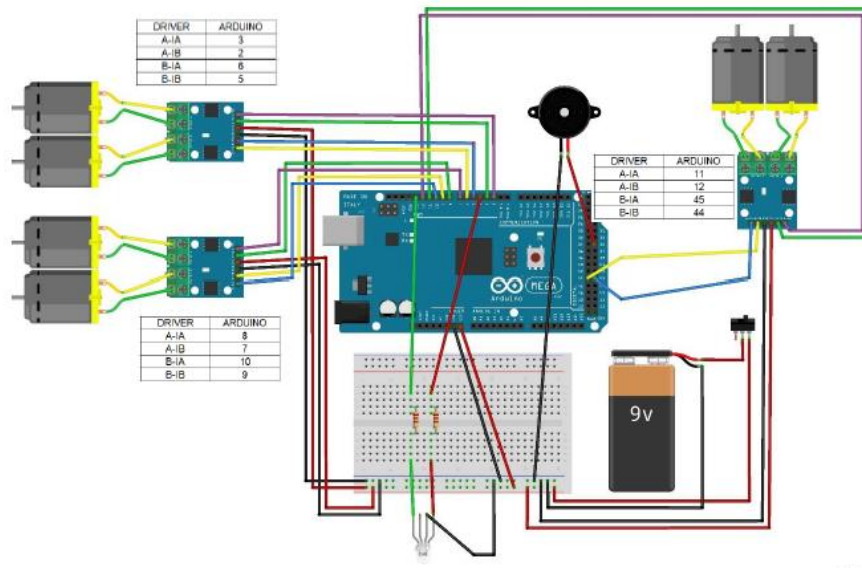


Figura 5.8. Esquema de conexiones de los motores.

Debido a que todos los driver deben ir conectados a la alimentación de la placa y a la mas y a que solo quedaba disponible un único pin de 5V en la *ELEGOO MEGA*, se optó por utilizar una mini breadboard de 170 pines de la marca *HiLetGo* como el que se muestra a continuación.



Figura 5.9. Mini Breadboard de 170 pines.

En la figura 5.10 se muestra cómo se han realizado todas las conexiones de cada uno de los motores y los servomotores con su controlador correspondiente, y las conexiones de dichos controladores con la placa *ELEGOO MEGA* que será la encargada de controlar a todo el conjunto de componentes para que el robot realice los movimientos deseados.

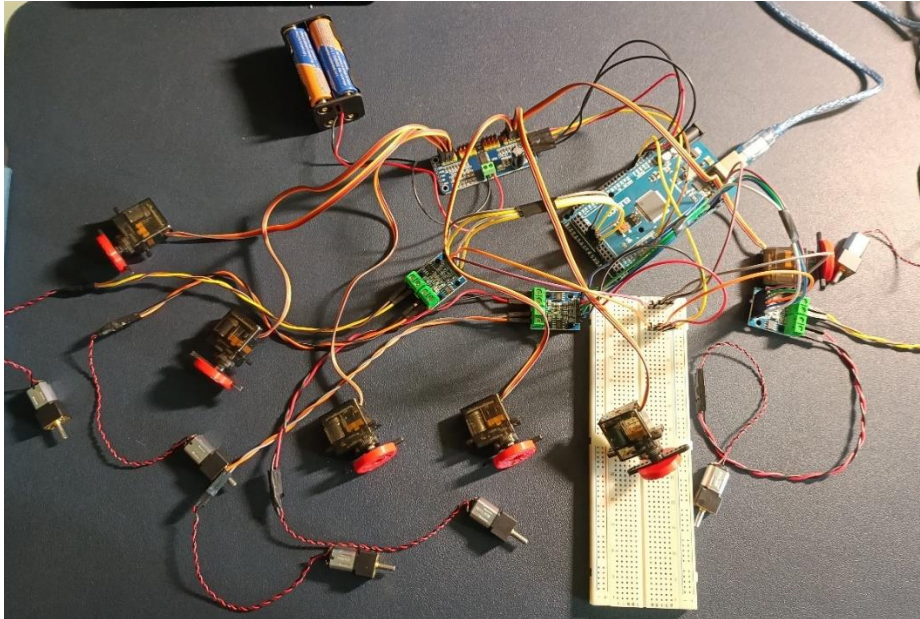


Figura 5.10. Montaje de prueba de todos los componentes.

Una vez que hemos probado cada uno de los componentes por separado, se pasa a probarlos juntos y a conectar la placa *ELEGOO MEGA* mediante su puerto de programación al software del Arduino IDE para poder programar la secuencia del movimiento a realizar por el rover y, así, comprobar las posiciones y el sentido de giro de los servos y motores.

El siguiente paso por seguir, después de haber probado los componentes electrónicos, es el montaje del chasis del rover Curiosity. Para ello, se han unido las piezas impresas del capítulo 3 mediante una serie de tornillos, arandelas y tuercas de diferentes métricas (ver Presupuesto) que permiten el movimiento rotario de los distintas partes del rover.

La idea inicial para unir la barra estabilizadora con los bogies frontales era utilizar un tornillo con la longitud necesaria para permitir el movimiento. Sin embargo, enseguida esta idea fue descartada puesto que un tornillo no cumplía con la particularidad de diseño del tipo de sistema de suspensión que utilizan los vehículos de esta clase (Rocker-Bogie). Por ello, se optó por la solución de colocar dos muelles entre la unión de la barra estabilizadora con los bogies frontales, de esta manera, se pueden sustituir las barras con juntas esféricas utilizadas en las simulaciones del capítulo 4.

Tan pronto como se ha terminado de montar el chasis del rover, se procederá a integrar la electrónica ya probada y programada con el montaje de las piezas 3D. Para empezar, se introducen los motores en sus huecos correspondientes dentro de los soportes de las ruedas y se acoplan dichos soporte con los servos mediante una arandela impresa en 3D. Después, se colocan la placa microcontroladora y los drivers de los motores y servos en la parte inferior del chasis del modelo, para ello se utilizó cinta de doble cara y pegamento termofusible.

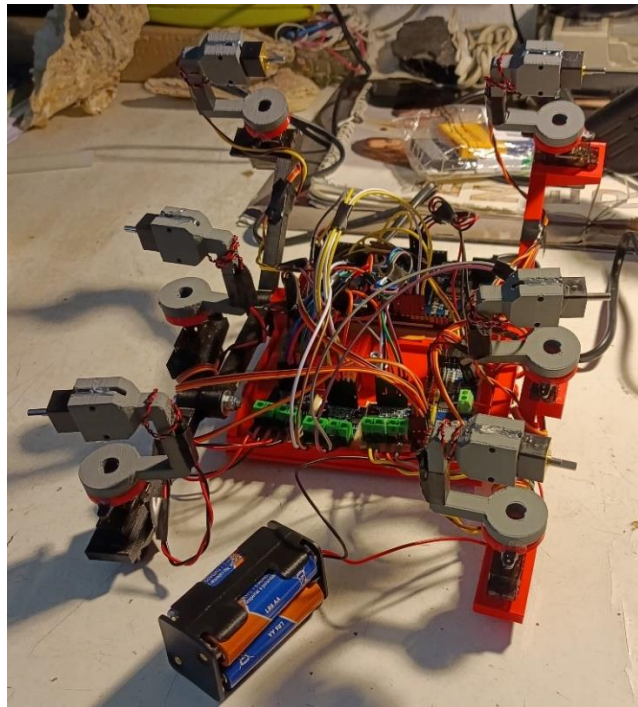


Figura 5.11. Integración de la estructura y la electrónica.

A continuación, se colocan las llantas impresas en las ruedas y se montan en los seis motores, de forma, que el modelo queda como se muestra en la figura 5.12.

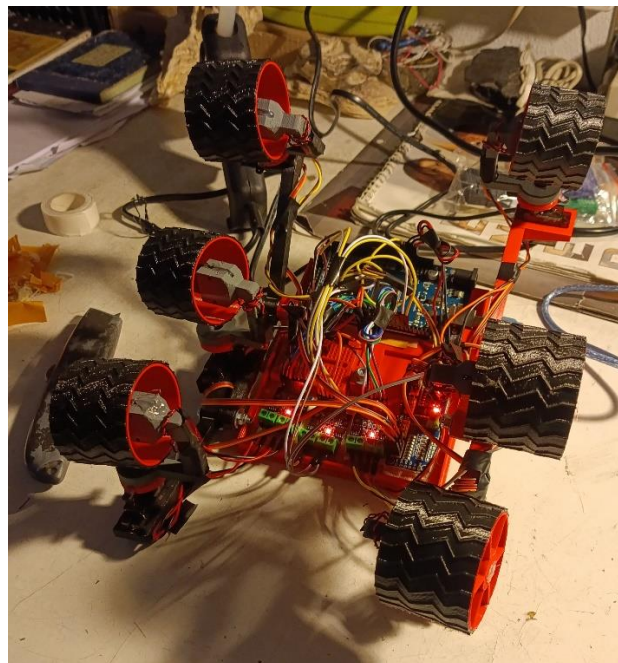


Figura 5.12. Rover implementado (vista inferior).

Con esto ya tendríamos el montaje del rover Curiosity funcionando. Sin embargo, esta implementación presenta un problema, la placa ELEGOO MEGA se está alimentando mediante el cable de programación con el ordenador, por lo tanto, todo el rover se está alimentando del ordenador. Todo esto implica que el rover no puede desplazarse por el suelo.

Para solucionar este problema se tomó la decisión de alimentar a todos los componentes mediante una batería de ión litio de 9V con una capacidad de 650mAh. Dicha batería de ión litio es recargable, por lo tanto, nos permite cargar al rover Curiosity en cualquier momento mediante un cable USB tipo C y, también, le permite al robot desplazarse por cualquier superficie sin depender de ningún cable.

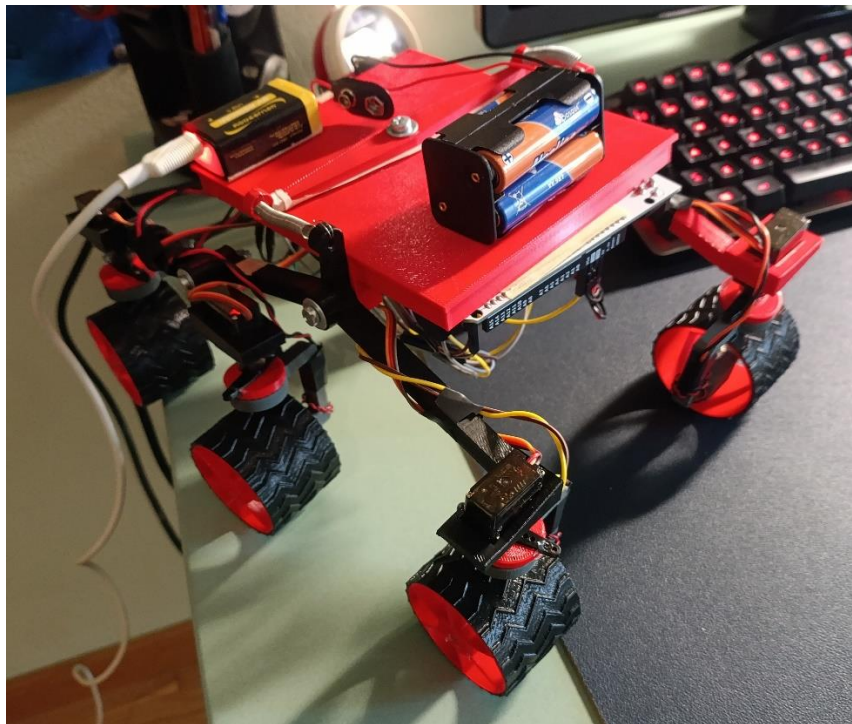


Figura 5.13. Implementación del rover Curiosity con batería.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

Tras lograr convertir un modelo casero a escala 1:10 de un rover Curiosity en un vehículo holonómico, se pueden extraer las siguientes conclusiones para resumir todo el trabajo llevado a cabo.

Para empezar, el uso de softwares de diseño mecánico en 3D, como en este caso es el *SolidWorks*, han permitido crear las modificaciones del modelo original necesarias para implementar el desplazamiento lateral del vehículo para, posteriormente, simular el comportamiento del diseño sin necesidad de desarrollar prototipos fallidos. De esta manera, se nos permite ahorrar costes gracias a la utilización de este tipo de softwares.

Habría que destacar la importancia que ha tenido en este trabajo, la posibilidad de realizar simulaciones cercanas a la realidad en un entorno de simulación como el *Simscape Multibody*. Dichas simulaciones han permitido conocer el comportamiento del mecanismo diseñado antes de llevar a cabo la implementación del mismo, permitiéndonos comprobar si el diseño de la modificación planteada es viable. Por otra parte, este mismo entorno de simulación nos ha permitido someter al modelo a diferentes situaciones para estudiar su comportamiento dinámico y analizar el alabeo y cabeceo que se produce en el rover en cada uno de los escenarios mediante varias gráficas.

En cuanto a la implementación y programación del rover Curiosity, la placa microcontroladora utilizada y su programación en el entorno de *Arduino* facilita y simplifica la tarea de llevar a cabo el movimiento del modelo. Esto se debe a que nos permite configurar y controlar todos los componentes electrónicos utilizados para implementar el movimiento del rover de una vez. Una mejora a futuro, en cuanto a la implementación del modelo, sería intentar simplificar el cableado del prototipo mediante la utilización de soldaduras o de circuitos impresos flexibles con conectores.

En conjunto, se ha demostrado mediante este proyecto que es posible mejorar significativamente la movilidad de los vehículos de exploración espacial, como el rover Curiosity, mediante modificaciones en el diseño mecánico y el control electrónico de los mismo. Dichas mejoras tecnológicas permitirían ir más allá en las misiones de exploración marciana, incrementando las capacidades de exploración y recopilación de datos de los exploradores marcianos.

Para finalizar, se plantean posibles trabajos futuros sobre este proyecto. Uno de ellos, es la realización del control remoto del modelo holonómico desarrollado en este trabajo, es decir, la implementación de un módulo bluetooth o de radiocontrol que permita manejar el vehículo. Una mejora a futuro, en cuanto a la implementación del modelo, sería modificar el diseño del chasis del vehículo para ocultar toda la electrónica del modelo o simplificar el cableado de este mediante soldaduras y circuitos impresos

flexibles *Hall-Flex*. También se podría añadir unos encoders a las ruedas del rover para conocer la velocidad del vehículo en cualquier instante y desarrollar un bucle de control PI que nos permita controlar la velocidad de cada una de las ruedas del rover.

7. Referencias

- [1] S. Alarcón Rubio, «Diseño, implementación y control remoto de un modelo a escala del rover Perseverance», Universidad Politécnica de Valencia, 2022.
- [2] M. Kaufman, «Mars Rover Curiosity Has First Big Malfunction», National Geographic. [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/130301-mars-rover-curiosity-malfunction-science-space-nasa-jpl>
- [3] A. Martí, «El antes y el después de Curiosity tras casi ocho años de misión y haber sobrevivido a múltiples averías», Xataka. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/espacio/antes-despues-curiosity-casi-ocho-anos-mision-haber-sobrevivido-a-multiples-averias>
- [4] D. Marín, «Curiosity, el robot marciano más complejo de la historia», EUREKA. [En línea]. Disponible en: <https://danielmarin.naukas.com/2011/11/19/curiosity-el-robot-marciano-mas-complejo-de-la-historia/>
- [5] D. Marín, «Mars Science Laboratory», Eureka. [En línea]. Disponible en: <https://danielmarin.naukas.com/2006/11/24/mars-science-laboratory/>
- [6] E. M. Fernández Aguilar, «Curiosity, la misión espacial a Marte», 26 de abril de 2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.muyinteresante.com/ciencia/1058.html>
- [7] mdsc, «10 años después de su aterrizaje, el Curiosity Mars Rover de la NASA continúa explorando», Madrid Deep Space Communications Complex. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdsc.nasa.gov/index.php/2022/08/09/10-anos-despues-de-su-aterrizaje-el-curiosity-mars-rover-de-la-nasa-continua-explorando/>
- [8] «El Rover Curiosity Cumple 4000 Días en Marte», NASANET. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanasa.net/misiones/marte/el-rover-curiosity-cumple-4000-dias-en-marte>
- [9] H. Martín Varela, «ESTUDIO DE UN ROVER CON SUSPENSIÓN ROCKER-BOGIE PARA MISIONES EN MARTE», Universitat Politècnica de Catalunya, 2021. [En línea]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/360872/TFE_Memoria_Hernan_Martin_Varela_fitxer%20de%20consulta.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [10] D. T. Ricaute Pinto y D. E. Rodríguez Mora, «Diseño e implementación del mecanismo Rocker-Bogie a un robot tipo rover», Universidad Autónoma de Bucaramanga. [En línea]. Disponible en: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/20507/2017_Articulo_Ricaute_Pinto_Daisy_Tatiana.pdf?sequence=1
- [11] K. Y. Lozano Sánchez, C. A. Cárdenas, y C. M. Estupiñan Manrique, «Prototipo de robot explorador de Monilioptora Roreri en cultivos de cacao en Cimitarra Santander».
- [12] B. Marshall, «Build a “real” Mars rover», RSDesingPark. [En línea]. Disponible en: <https://www.rs-online.com/designspark/build-a-real-mars-rover>
- [13] javacasm, «Curiosity BTL», GitHub. [En línea]. Disponible en: https://github.com/javacasm/curiosity_btl

- [14] S. Peciña, «Cómo imprimir con filamento PLA?», EOLAS Prints. [En línea]. Disponible en: <https://eolasprints.com/es/blogs/3d-printing-guides/how-to-print-with-pla>
- [15] «ELEGOO Mega 2560 R3 - Placa Base», powerplanetonline.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.powerplanetonline.com/es/elegoo-mega-2560-r3-placa-base>
- [16] «TUTORIAL MÓDULO CONTROLADOR DE SERVOS PCA9685 CON ARDUINO», MAYLAMP Mechatronics. [En línea]. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/41_tutorial-modulo-controlador-de-servos-pca9685-con-arduino.html
- [17] «Módulo Puente H L9110», Ferretrónica. [En línea]. Disponible en: <https://ferretronica.com/products/modulo-puente-h-l9110#:~:text=El%20M%C3%B3dulo%20Puente%20H%20L9110,2%20motores%20de%20manera%20independiente.>
- [18] «Micro Servo MG90s», AV Electronics. [En línea]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/micro-servo-mg90s/#:~:text=Servomotor%20de%20tama%C3%B1o%20peque%C3%B1o%20ideal,90%C2%B0%20en%20cada%20direcci%C3%B3n.>

8. Anexos

ANEXO 1. PROGRAMACIÓN

```

//          FRONT

//  M1S1              M6S6
//    \              /
//    \              /
//  M2S2-----M5S5
//    /              \
//    /              \
//  M3S3              M4S4

//          REAR
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

Adafruit_PWMServoDriver servos = Adafruit_PWMServoDriver(); //Se declara
el controlador de los servos

void writeServos(int nservo, int angulo);
void delante(int a, int b);
void atras(int a, int b);
void stop(void);

//PINES
int pinS1 = 0;
int pinS2 = 1;
int pinS3 = 2;
int pinS4 = 13;
int pinS5 = 14;
int pinS6 = 15;
int AIA_1 = 2;
int AIB_1 = 3;
int BIA_1 = 5;
int BIB_1 = 6;
int AIA_2 = 8;
int AIB_2 = 7;
int BIA_2 = 10;
int BIB_2 = 9;
int AIA_3 = 44;
int AIB_3 = 45;
int BIA_3 = 11;

```

```

int BIB_3 = 12;

void setup() {
  servos.begin();
  servos.setPwmFreq(60); //Se configura la frecuencia de los servos
  delay(200);

  pinMode(pinS1, OUTPUT);
  pinMode(pinS2, OUTPUT);
  pinMode(pinS3, OUTPUT);
  pinMode(pinS4, OUTPUT);
  pinMode(pinS5, OUTPUT);
  pinMode(pinS6, OUTPUT);
  pinMode(AIA_1, OUTPUT);
  pinMode(AIB_1, OUTPUT);
  pinMode(BIA_1, OUTPUT);
  pinMode(BIB_1, OUTPUT);
  pinMode(AIA_2, OUTPUT);
  pinMode(AIB_2, OUTPUT);
  pinMode(BIA_2, OUTPUT);
  pinMode(BIB_2, OUTPUT);
  pinMode(AIA_3, OUTPUT);
  pinMode(AIB_3, OUTPUT);
  pinMode(BIA_3, OUTPUT);
  pinMode(BIB_3, OUTPUT);
}

void loop() {

  //DELANTE
  writeServos(pinS1, 0);
  writeServos(pinS2, 0);
  writeServos(pinS3, 0);
  writeServos(pinS4, 0);
  writeServos(pinS5, 0);
  writeServos(pinS6, 90);
  delay(200);

  delante(50, 50);
  delay(3000);

  stop(); //Paramos los motores para el cambio de sentido (sino
saltan)
  delay(200);
}

```

```
//ATRAS
writeServos(pinS1, 0);
writeServos(pinS2, 0);
writeServos(pinS3, 0);
writeServos(pinS4, 0);
writeServos(pinS5, 0);
writeServos(pinS6, 90);
delay(200);

atras(50, 50);
delay(3000);

stop();
delay(200);

//GIRO IZQUIERDA
writeServos(pinS1, 30);
writeServos(pinS2, 0);
writeServos(pinS3, 30);
writeServos(pinS4, 30);
writeServos(pinS5, 0);
writeServos(pinS6, 140);
delay(200);

delante(50, 50);
delay(4000);

stop();
delay(100);

//GIRO DERECHA
writeServos(pinS1, 160);
writeServos(pinS2, 0);
writeServos(pinS3, 160);
writeServos(pinS4, 160);
writeServos(pinS5, 0);
writeServos(pinS6, 60);
delay(200);

//delante(100, 100);
analogWrite(AIA_1, 0);
analogWrite(AIA_2, 50);
analogWrite(AIA_3, 50);
analogWrite(AIB_1, 50);
```

```
analogWrite(AIB_2, 0);
analogWrite(AIB_3, 0);
analogWrite(BIA_1, 50);
analogWrite(BIA_2, 0);
analogWrite(BIA_3, 0);
analogWrite(BIB_1, 0);
analogWrite(BIB_2, 50);
analogWrite(BIB_3, 50);
delay(2000);

stop();
delay(200);

//LATERAL IZQUIERDA
writeServos(pinS1, 90);
writeServos(pinS2, 90);
writeServos(pinS3, 90);
writeServos(pinS4, 90);
writeServos(pinS5, 90);
writeServos(pinS6, 0);
delay(200);

delante_lat(50, 50);
delay(2000);

stop();
delay(200);

//LATERAL DERECHA
writeServos(pinS1, 90);
writeServos(pinS2, 90);
writeServos(pinS3, 90);
writeServos(pinS4, 90);
writeServos(pinS5, 90);
writeServos(pinS6, 0);
delay(200);

atras_lat(50, 50);
delay(2000);

stop();
delay(200);

//DIAGONAL IZQUIERDA
writeServos(pinS1, 45);
writeServos(pinS2, 45);
writeServos(pinS3, 45);
```

```

writeServos(pinS4, 45);
writeServos(pinS5, 45);
writeServos(pinS6, 145);
delay(200);

delante_lat(50, 50);
analogWrite(AIA_3, 50);
analogWrite(AIB_3, 0);

delay(2000);

stop();
delay(200);

//DIAGONAL DERECHA
writeServos(pinS1, 145);
writeServos(pinS2, 145);
writeServos(pinS3, 145);
writeServos(pinS4, 145);
writeServos(pinS5, 145);
writeServos(pinS6, 45);
delay(200);

atras_lat(50, 50);

delay(2000);

stop();
delay(200);

//PARO
writeServos(pinS1, 0);
writeServos(pinS2, 0);
writeServos(pinS3, 0);
writeServos(pinS4, 0);
writeServos(pinS5, 0);
writeServos(pinS6, 90);
delay(1000);

stop();
delay(5000);
}

////////Función movimiento de los servos
//////////

```

```

void writeServos(int nservo, int angulo) {
    #define SERVOMIN 120
    #define SERVOMAX 580

    int ang = map(angulo, 0, 180, SERVOMIN, SERVOMAX);
    servos.setPWM(nservo, 0, ang);
}
/////Función movimiento motores
////////////////////////////////////
void delante(int a, int b) {

    analogWrite(AIA_1, a);
    analogWrite(AIA_2, 0);
    analogWrite(AIA_3, a);
    analogWrite(AIB_1, 0);
    analogWrite(AIB_2, a);
    analogWrite(AIB_3, 0);
    analogWrite(BIA_1, b);
    analogWrite(BIA_2, 0);
    analogWrite(BIA_3, b);
    analogWrite(BIB_1, 0);
    analogWrite(BIB_2, b);
    analogWrite(BIB_3, 0);
}

void atras(int a, int b) {

    analogWrite(AIA_1, 0);
    analogWrite(AIA_2, a);
    analogWrite(AIA_3, 0);
    analogWrite(AIB_1, a);
    analogWrite(AIB_2, 0);
    analogWrite(AIB_3, a);
    analogWrite(BIA_1, 0);
    analogWrite(BIA_2, b);
    analogWrite(BIA_3, 0);
    analogWrite(BIB_1, b);
    analogWrite(BIB_2, 0);
    analogWrite(BIB_3, b);
}

void stop(void) {

    analogWrite(AIA_1, 0);

```

```
analogWrite(AIA_2, 0);
analogWrite(AIA_3, 0);
analogWrite(AIB_1, 0);
analogWrite(AIB_2, 0);
analogWrite(AIB_3, 0);
analogWrite(BIA_1, 0);
analogWrite(BIA_2, 0);
analogWrite(BIA_3, 0);
analogWrite(BIB_1, 0);
analogWrite(BIB_2, 0);
analogWrite(BIB_3, 0);
}

void delante_lat(int a, int b) {

    analogWrite(AIA_1, a);
    analogWrite(AIA_2, 0);
    analogWrite(AIA_3, 0);
    analogWrite(AIB_1, 0);
    analogWrite(AIB_2, a);
    analogWrite(AIB_3, a);
    analogWrite(BIA_1, b);
    analogWrite(BIA_2, 0);
    analogWrite(BIA_3, b);
    analogWrite(BIB_1, 0);
    analogWrite(BIB_2, b);
    analogWrite(BIB_3, 0);
}

void atras_lat(int a, int b) {

    analogWrite(AIA_1, 0);
    analogWrite(AIA_2, a);
    analogWrite(AIA_3, a);
    analogWrite(AIB_1, a);
    analogWrite(AIB_2, 0);
    analogWrite(AIB_3, 0);
    analogWrite(BIA_1, 0);
    analogWrite(BIA_2, b);
    analogWrite(BIA_3, 0);
    analogWrite(BIB_1, b);
    analogWrite(BIB_2, 0);
    analogWrite(BIB_3, b);
}
```


}

ANEXO 2. PLIEGO DE CONDICIONES

En este documento se establecen las condiciones que deberán de cumplimentar las dos partes del contrato, la propiedad y el contratista, para la ejecución del proyecto de diseño e implementación del modelo del Rover Curiosity con desplazamiento lateral.

2.1 Objeto del Pliego

El objeto de este pliego de condiciones es definir las especificaciones técnicas necesarias para el desarrollo, diseño y construcción del proyecto del modelo a escala del Rover Curiosity con desplazamiento lateral.

2.2 Condiciones Generales

Será necesaria la aplicación del Reglamento Electrónico de Baja Tensión (*REBT*) y la Normativa de Trabajos Fin de Grado y Trabajos Fin de Máster publicada en el Boletín Oficial de la Universidad Politècnica de Valencia (*BOUPV*).

Todos los materiales utilizados en el presente proyecto deberán de garantizar el correcto y adecuado funcionamiento del modelo a escala del rover.

2.3 Condiciones de Ejecución

A continuación, se muestran los pasos a seguir para una correcta ejecución del proyecto, llevado a cabo por personal cualificado y autorizado por la propiedad, que será la responsable de cumplir y hacer cumplir las condiciones aquí expuestas:

1. Planteamiento de la incorporación de los servomotores centrales.
2. Diseño del rover mediante un programa de diseño mecánico.
3. Simulación del modelo mediante un software de simulación multicuerpo para sistemas mecánicos.
4. Análisis y valoración de los resultados obtenidos.
5. Diseño de la electrónica del modelo del rover.
6. Implementación y montaje del modelo del rover.
7. Programación de la secuencia de movimiento del modelo del rover.
8. Puesta en marcha del robot en un entorno controlado.

9. Depuración de errores de funcionamiento.

2.4 Puesta en Marcha

La propiedad se compromete a realizar la puesta en marcha del modelo a escala del rover antes de la entrega de este al contratista. Esta fase de puesta en marcha permitirá a la propiedad identificar y depurar los posibles errores de funcionamiento encontrados desde la fase de diseño hasta la de implementación.

ANEXO 3. PRESUPUESTO

Descrip.	P.U.	Uds.	SUBTOTAL
Impresión 3D Modelo a escala del Rover Curiosity	8,00	22	176,00
Impresión 3D Piezas adicionales	8,00	2	16,00
Placa ELEGOO Mega 2560 R3	22,09	1	22,09
AZDelivery Jumper Wire Cables de Puente 20 cm 3 x 40 pcs	6,99	1	6,99
Módulo controlador de servos PCA96B5	3,24	1	3,24
Driver L9110 doble puente en H	1,18	3	3,54
Motor de engranajes Micro DC N20	2,73	6	16,38
Micro Servo Motor MG90 9g	1,17	6	7,02
Portapilas para 4 Pilas LR6 AA 1.5V	4,46	1	4,46
Tornillos M4x30	0,50	6	3,00
Tornillos M4x25	0,50	2	1,00
Tornillos M3x40	0,50	4	2,00
Tornillos M2x8	0,40	8	3,20
Arandelas plana M4	0,10	18	1,80
Tuercas autoblocantes M4	0,30	9	2,70
Muelles de Extensión de Acero inoxidable	3,00	2	5,99
Pilas Alcalinas AA 1,5V	1,00	4	3,99 €
Mini Breadboard 170 conexiones	1,42	1	1,42
Batería Recargable 9V 650mAh	9,89	1	9,89
Acoplador conexión Cables-Pila	2,50	1	2,50
Cinta aislante	0,95	1	0,95
Cinta de doble cara	2,50	1	2,50
Barra de Pegamento Termofusible	0,50	1	0,50
		TOTAL	296,66 euros

Descrip.	PBH	Hrs.	SUBTOTAL
Diseño CAD	20,00	20	400,00
Simulaciones	20,00	30	600,00
Montaje	20,00	25	500,00
Programación movimiento	20,00	10	200,00
Proyecto de diseño e implementación de un modelo a escala del rover Curiosity con desplazamiento lateral en español	20,00	50	1000,00
TOTAL			2700,00 euros

	296,66	
	<u>2700,00</u>	
PRESUPUESTO	2996,66	euros

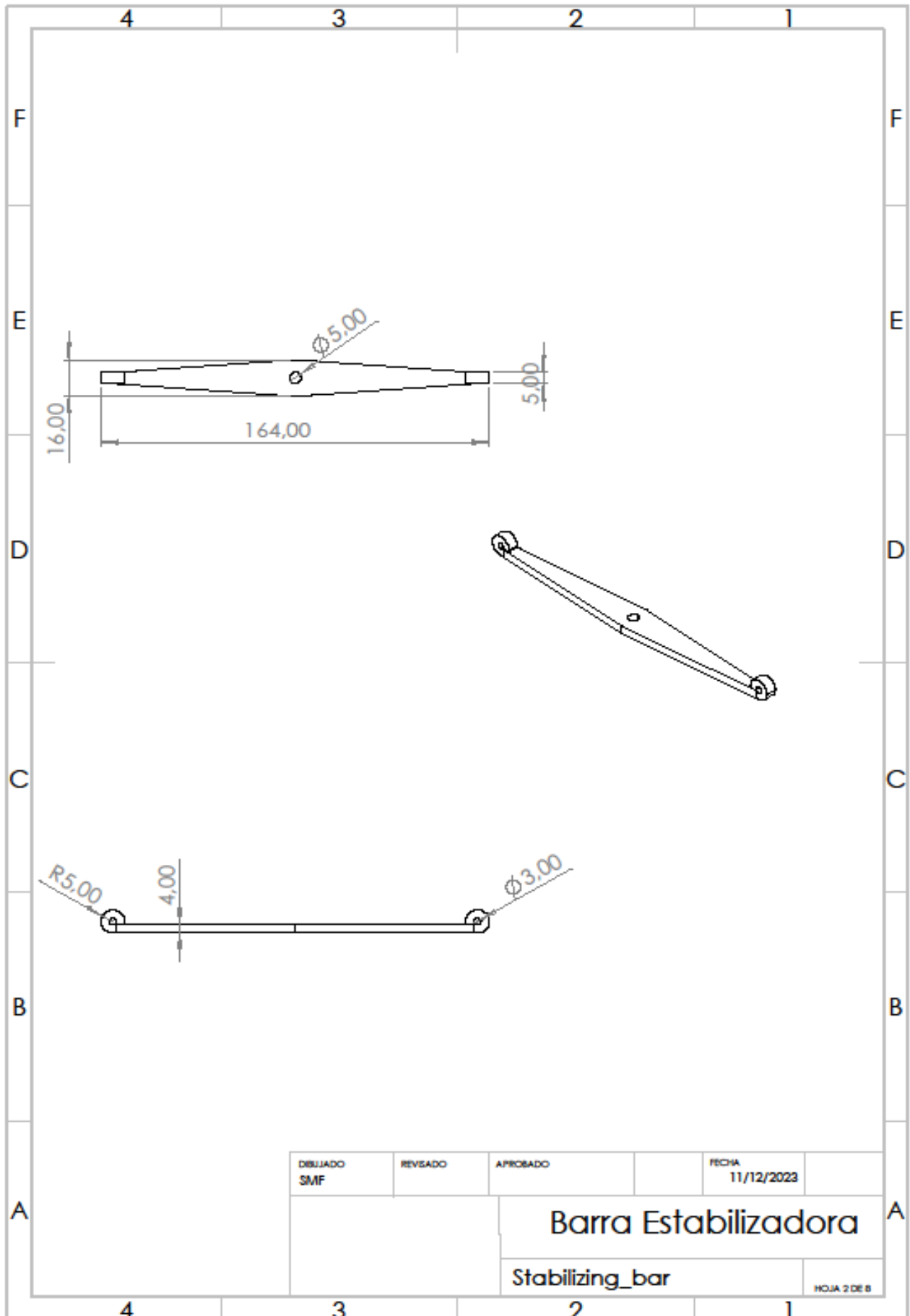
Asciende el presente presupuesto a la expresada cantidad de:

DOS MIL NOVECIENTOS NOVENTA Y NUEVE EUROS CON SESENTA Y SEIS CÉNTIMOS

León, a 20 de junio de 2024

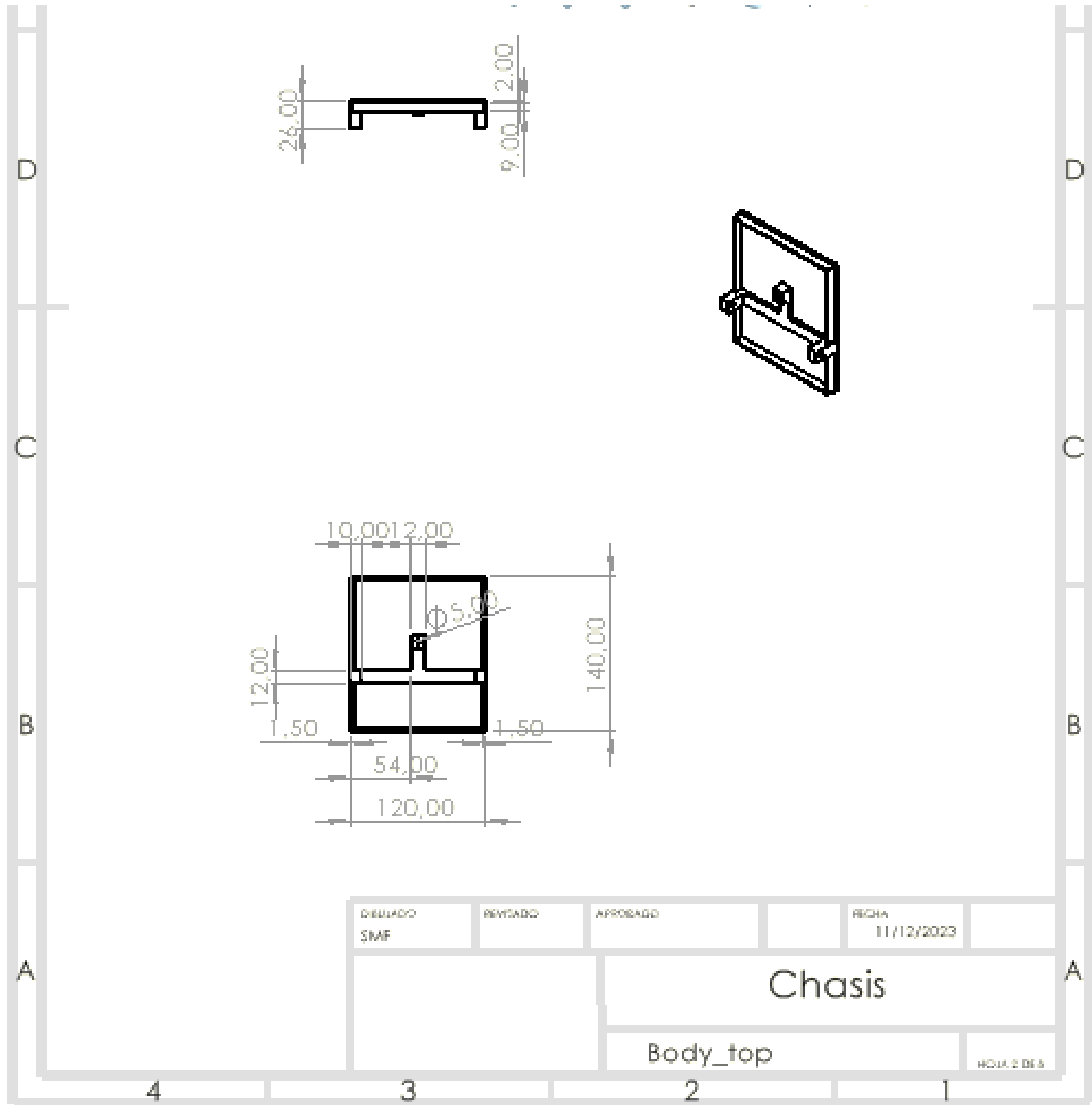
ANEXO 4. PLANOS

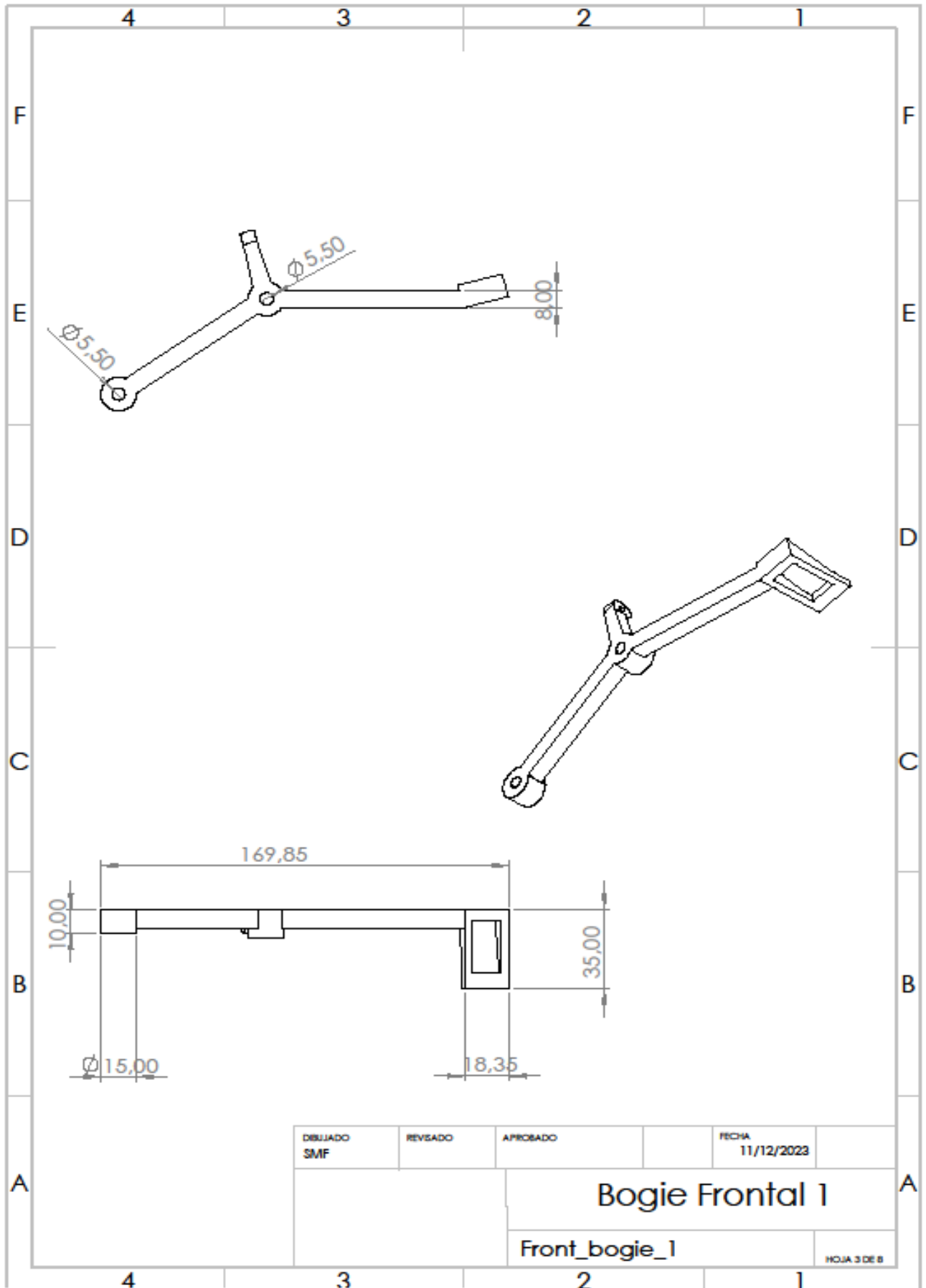
1. BARRA ESTABILIZADORA	70
2. CHASIS	71
3. BOGIE FRONTAL 1	72
4. BOGIE FRONTAL 2	73
5. BOGIE TRASERO 1	74
6. BOGIE TRASERO 2	75
7. SOPORTE RUEDA	76
8. RUEDA	77



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

ESCALA DE UN ROVER CURIOSITY

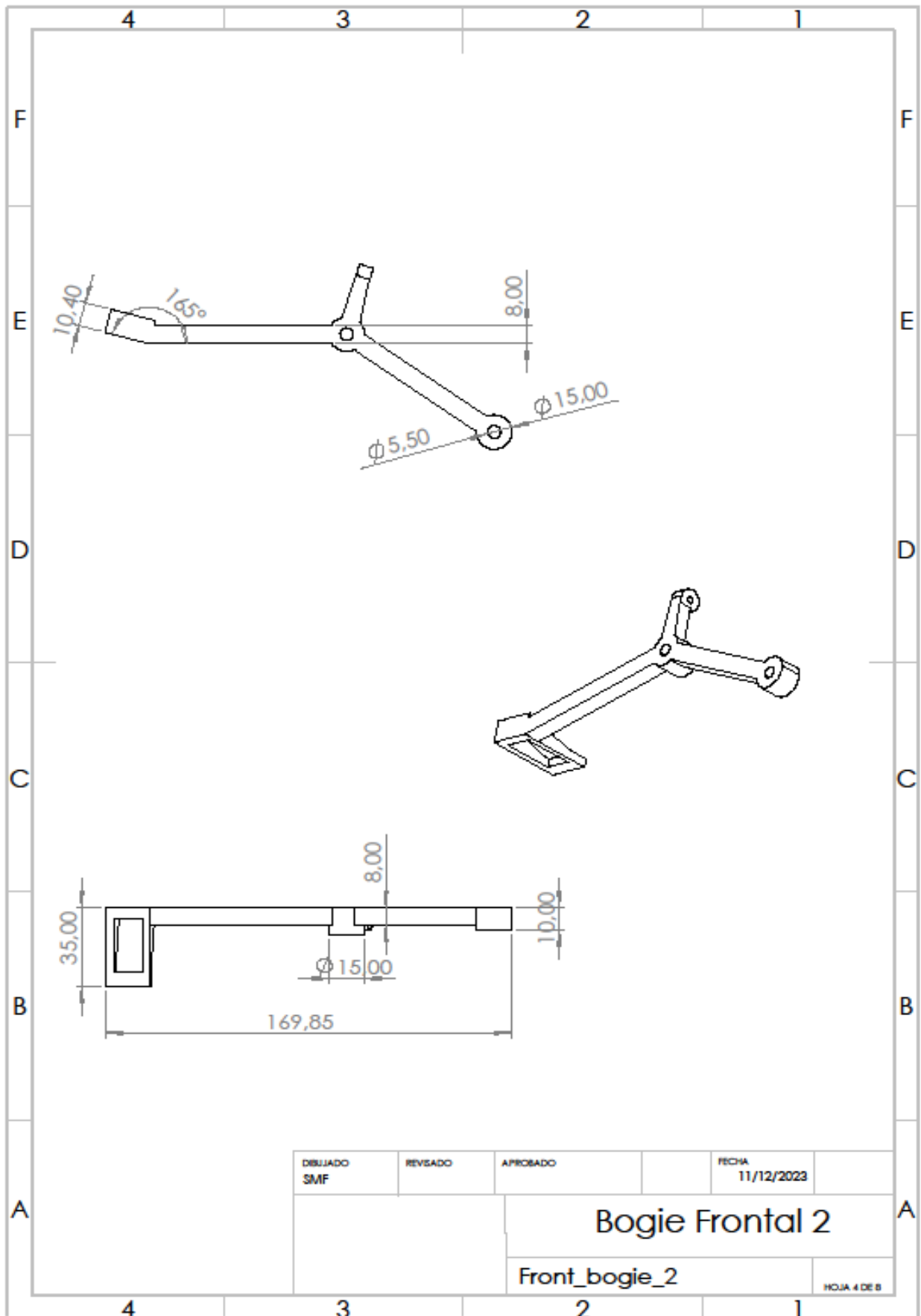




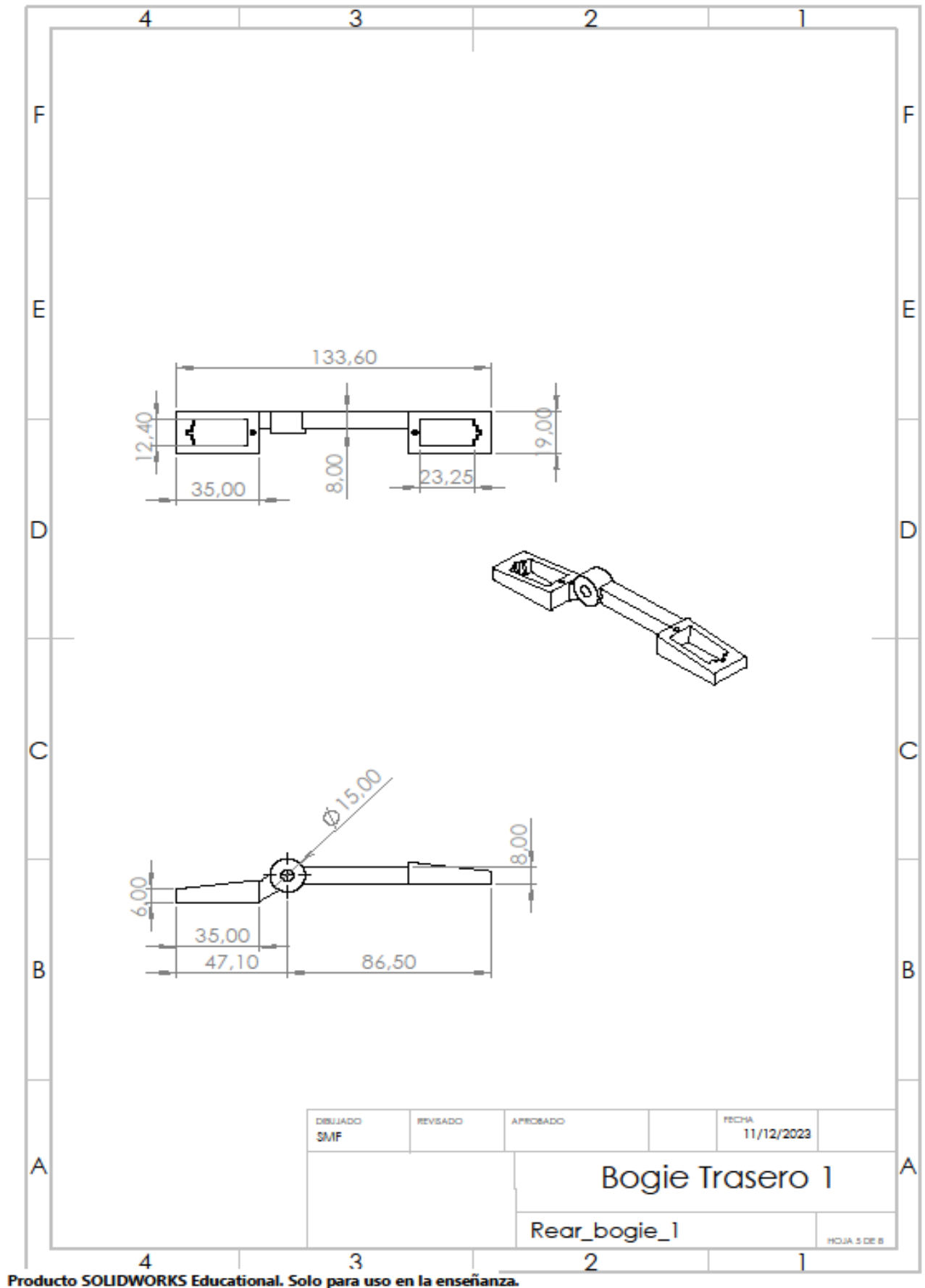
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN MODELO A
ESCALA DE UN ROVER CURIOSITY

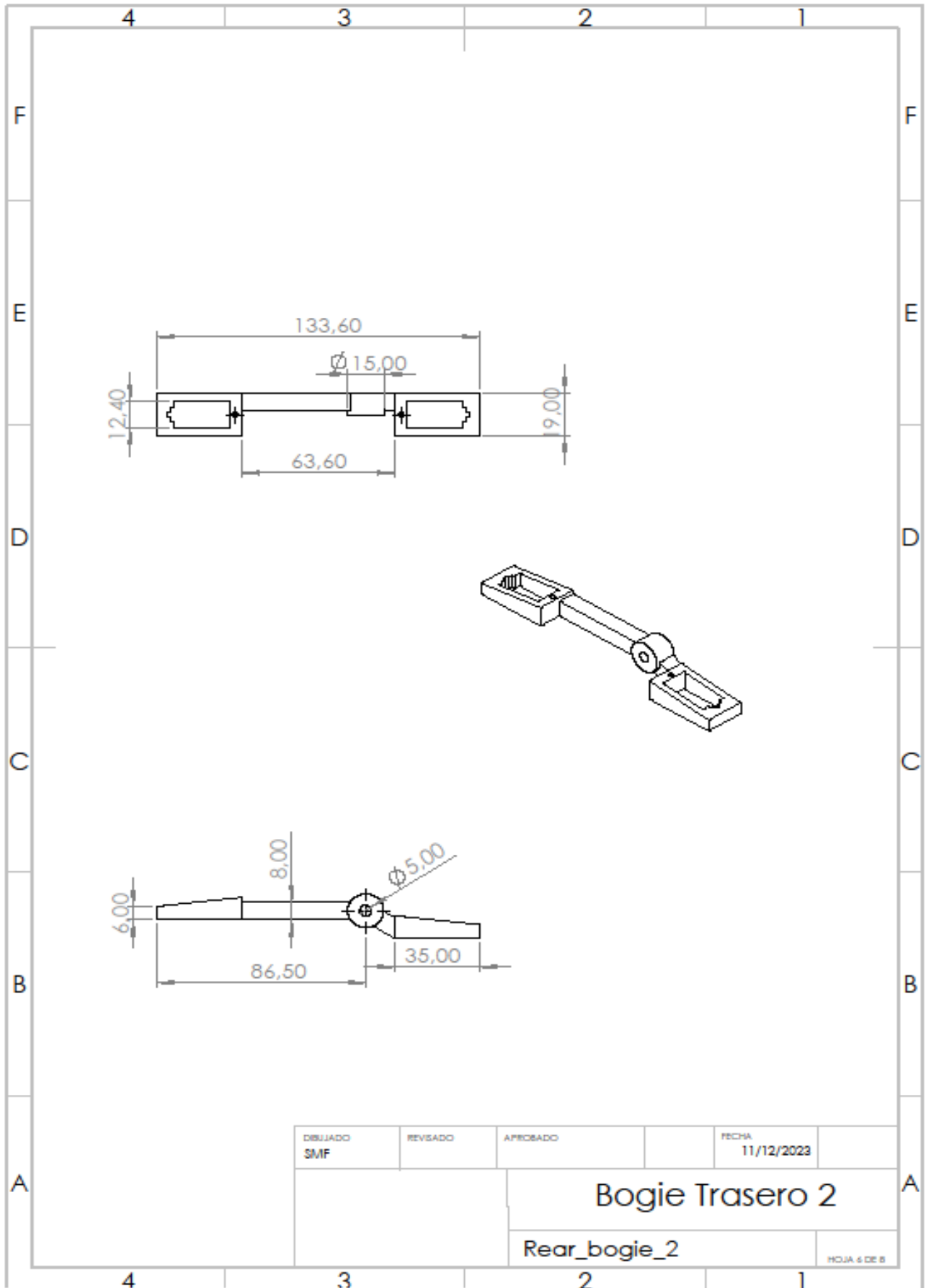
SOFÍA MARTÍNEZ FERNÁNDEZ



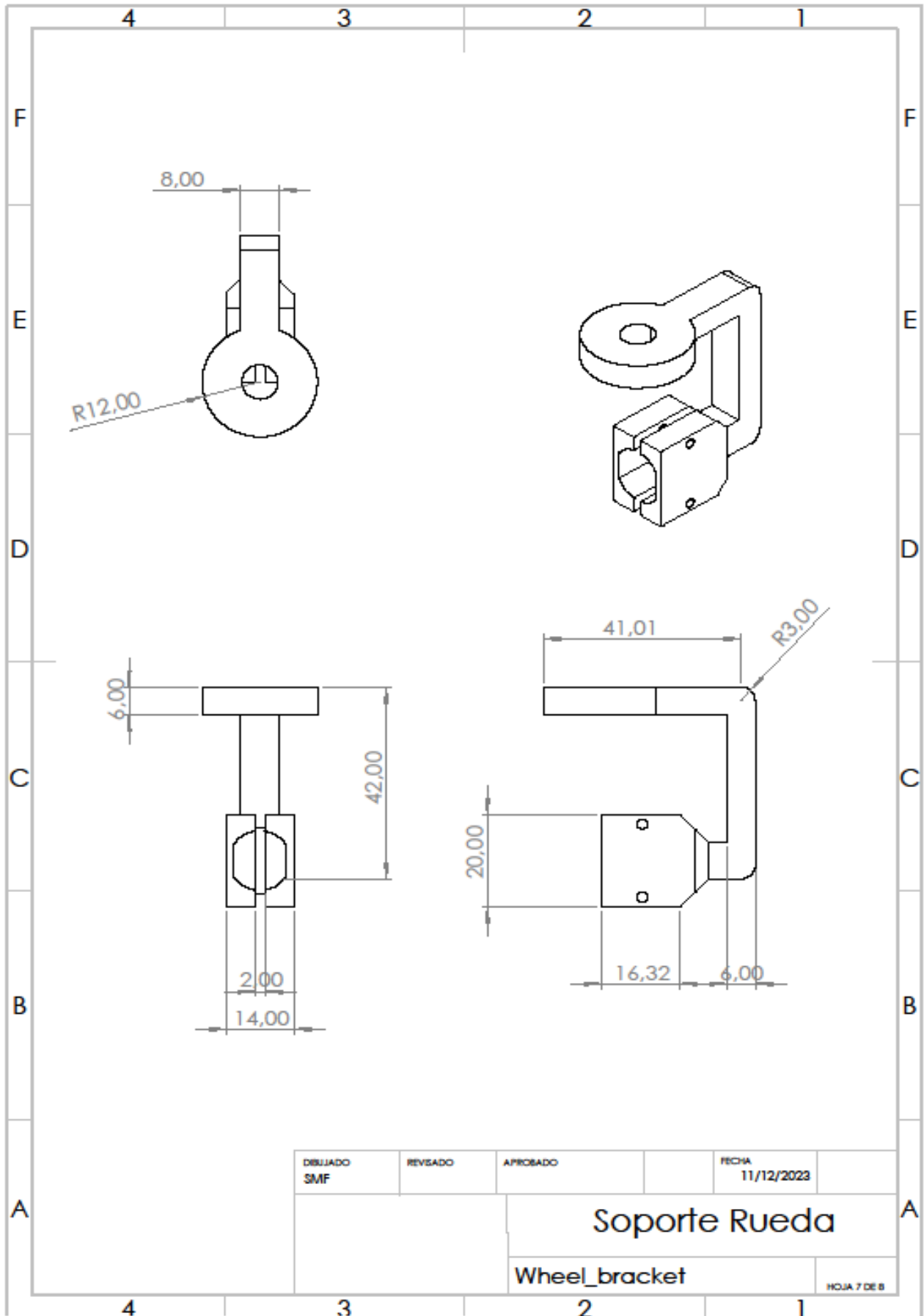
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



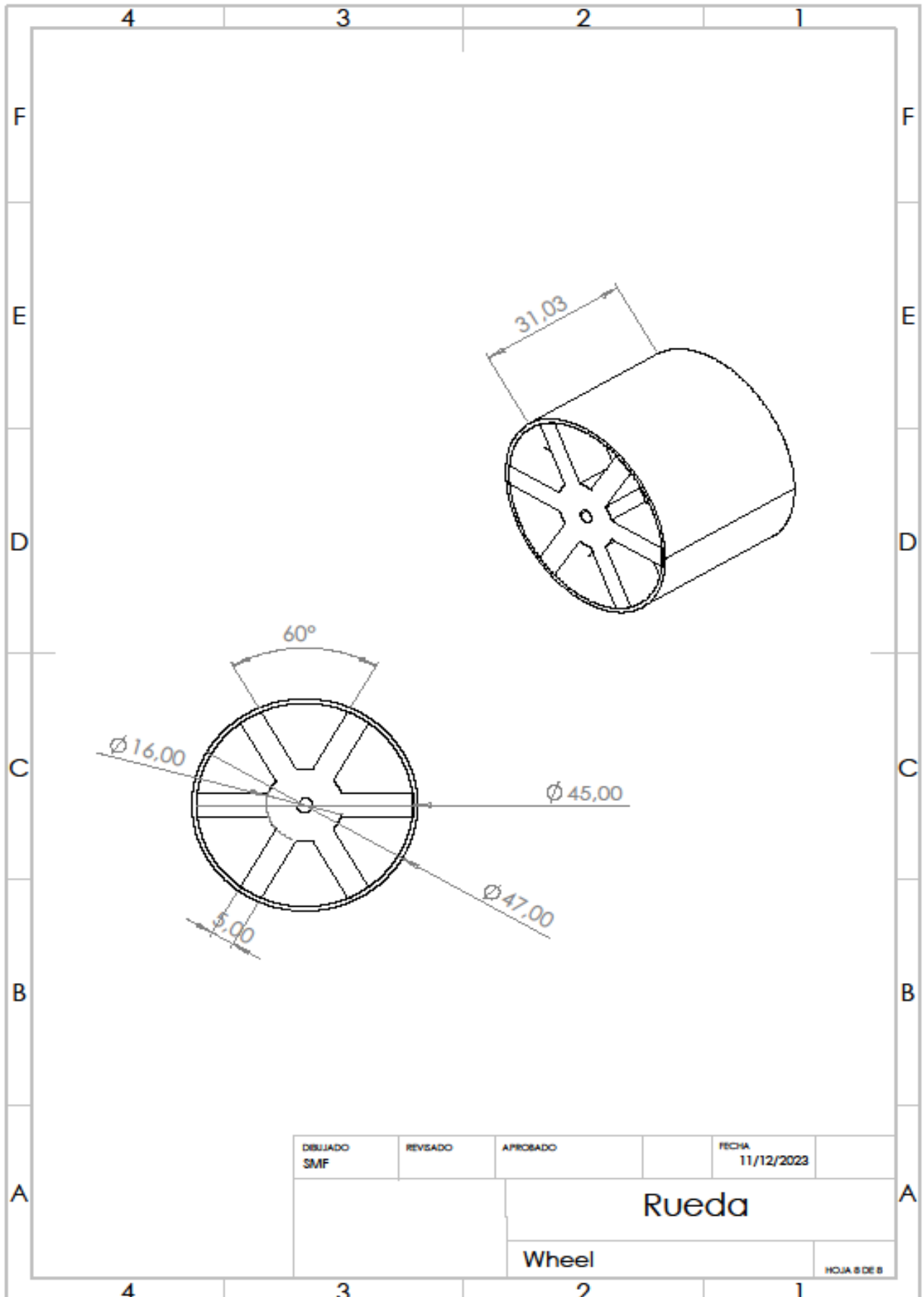
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN MODELO A
ESCALA DE UN ROVER CURIOSITY

SOFÍA MARTÍNEZ FERNÁNDEZ



DIBUJADO SMF	REVISADO	APROBADO	FECHA 11/12/2023
		Rueda	
		Wheel	
			HOJA 6 DE 8