Universidad del Atlántico	**CÓDIGO:** FOR-DO-109
	VERSIÓN: 0
	FECHA: 03/06/2020

AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO

Autor1

Puerto Colombia, **09 de agosto 2024**

Señores
DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS
Universidad del Atlántico
Cuidad

Asunto: Autorización Trabajo de Grado

Cordial saludo,

Yo, **JAIME ANDRES BRAVO CASTRO,** identificado(a) con **C.C. No. 1.140.885.239** de **BARRANQUILLA**, autor(a) del trabajo de grado titulado **MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5 KG**. presentado y aprobado en el año **2023** como requisito para optar al título Profesional de **INGENIERO MECÁNICO.**; autorizo al Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico para que, con fines académicos, la producción académica, literaria, intelectual de la Universidad del Atlántico sea divulgada a nivel nacional e internacional a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios del Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web institucional, en el Repositorio Digital y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad del Atlántico.
- Permitir consulta, reproducción y citación a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Esto de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Atentamente,

Firma
JAIME ANDRES BRAVO CASTRO
C.C. No. 1.140.885.239 de **BARRANQUILLA**

Universidad del Atlántico	**CÓDIGO:** FOR-DO-109
	VERSIÓN: 0
	FECHA: 03/06/2020

AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO

Autor2

Puerto Colombia, **09 de agosto 2024**

Señores
DEPARTAMENTO DE BIBLIOTECAS
Universidad del Atlántico
Cuidad

Asunto: Autorización Trabajo de Grado

Cordial saludo,

Yo, **MAXISTE FABIAN PACHECO MONTERROSA**, identificado(a) con **C.C. No. 1.143.462.396** de **BARRANQUILLA**, autor(a) del trabajo de grado titulado **MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5KG**. presentado y aprobado en el año **2023** como requisito para optar al título Profesional de **INGENIERO MECÁNICO.**; autorizo al Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico para que, con fines académicos, la producción académica, literaria, intelectual de la Universidad del Atlántico sea divulgada a nivel nacional e internacional a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios del Departamento de Bibliotecas de la Universidad del Atlántico pueden consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web institucional, en el Repositorio Digital y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad del Atlántico.
- Permitir consulta, reproducción y citación a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD-ROM o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Esto de conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Atentamente,

Firma
MAXISTE FABIAN PACHECO MONTERROSA.
C.C. No. 1.143.462.396 de **BARRANQUILLA**

Universidad del Atlántico	CÓDIGO: FOR-DO-110
	VERSIÓN: 01
	FECHA: 02/DIC/2020

DECLARACIÓN DE AUSENCIA DE PLAGIO EN TRABAJO ACADÉMICO PARA GRADO

Este documento debe ser diligenciado de manera clara y completa, sin tachaduras o enmendaduras y las firmas consignadas deben corresponder al (los) autor (es) identificado en el mismo.

Puerto Colombia, **09 de agosto 2024**

Una vez obtenido el visto bueno del director del trabajo y los evaluadores, presento al **Departamento de Bibliotecas** el resultado académico de mi formación profesional o posgradual. Asimismo, declaro y entiendo lo siguiente:

- El trabajo académico es original y se realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, en consecuencia, la obra es de mi exclusiva autoría y detento la titularidad sobre la misma.
- Asumo total responsabilidad por el contenido del trabajo académico.
- Eximo a la Universidad del Atlántico, quien actúa como un tercero de buena fe, contra cualquier daño o perjuicio originado en la reclamación de los derechos de este documento, por parte de terceros.
- Las fuentes citadas han sido debidamente referenciadas en el mismo.
- El (los) autor (es) declara (n) que conoce (n) lo consignado en el trabajo académico debido a que contribuyeron en su elaboración y aprobaron esta versión adjunta.

Título del trabajo académico:	MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5KG
Programa académico:	Ingeniería Mecánica

Firma de Autor 1:								
Nombres y Apellidos:	Jaime Andrés Bravo Castro							
Documento de Identificación:	CC	x	CE		PA		Número:	1.140.885.239
Nacionalidad:	Colombiano				Lugar de residencia:			Barranquilla
Dirección de residencia:	Calle 60 # 21B - 130							
Teléfono:					Celular:			3126448755

Firma de Autor 2:								
Nombres y Apellidos:	Maxiste Fabián Pacheco Monterrosa							
Documento de Identificación:	CC	x	CE		PA		Número:	1.143.462.396
Nacionalidad:	Colombiano				Lugar de residencia:			Barranquilla
Dirección de residencia:	Cra 22 # 15 - 15							
Teléfono:					Celular:			3045854053

Universidad del Atlántico	**CÓDIGO:** FOR-DO-111
	VERSIÓN: 0
	FECHA: 03/06/2020

FORMULARIO DESCRIPTIVO DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO DE GRADO	**MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5KG**
AUTOR(A) (ES)	**JAIME ANDRES BRAVO CASTRO** **MAXISTE FABIAN PACHECO MONTERROSA**
DIRECTOR (A)	**JAVIER AGUSTÍN ROLDÁN MCKINLEY**
CO-DIRECTOR (A)	**EUGENIO YIME RODRÍGUEZ**
JURADOS	**LISANDRO VARGAS HENRÍQUEZ** **ALEX BARRAZA CANTILLO**
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE	**INGENIERO MECÁNICO**
PROGRAMA	**INGENIERÍA MECÁNICA**
PREGRADO / POSTGRADO	**PREGRADO**
FACULTAD	**INGENIERÍA**
SEDE INSTITUCIONAL	**SEDE NORTE**
AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO	**2024**
NÚMERO DE PÁGINAS	
TIPO DE ILUSTRACIONES	**TABLAS Y FIGURAS**
MATERIAL ANEXO (VÍDEO, AUDIO, MULTIMEDIA O PRODUCCIÓN ELECTRÓNICA)	**NO APLICA**
PREMIO O RECONOCIMIENTO	**NO APLICA**

MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5KG

JAIME ANDRES BRAVO CASTRO

MAXISTE FABIAN PACHECO MONTERROSA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

PUERTO COLOMBIA

2024

MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5KG

JAIME ANDRES BRAVO CASTRO

MAXISTE FABIAN PACHECO MONTERROSA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

JAVIER AGUSTÍN ROLDÁN MCKINLEY

INGENIERO MECANICO, PHD

CO-DIRECTOR

EUGENIO YIME RODRÍGUEZ

INGENIERO MECANICO, PHD

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

PUERTO COLOMBIA

2024

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

A Dios, quien fue mi guía a lo largo de este camino y me dio las fuerzas para no rendirme.

A mi padre, Jaime Bravo Acosta, que en paz descanse, por ser pilar fundamental en mi vida y ayuda constante en mi carrera.

A mi madre Judith Castro Carrascal, quien con su esfuerzo constante a lo largo de todos estos años me permitieron alcanzar esta meta.

A mis amigos, quienes hicieron parte de este proceso y con quienes logré superar muchos obstáculos que se nos presentaron en el camino.

A todas las personas que estuvieron presentes y me ayudaron a crecer de forma personal y profesional.

Jaime Andrés Bravo Castro

A Dios, por todas las oportunidades brindadas a mi persona.

A mi padre, Angel Pacheco Avila, por su esfuerzo y guía constante en ayudarme a lograr esta meta.

A mi madre, Judith Monterrosa García, por su amor y apoyo.

A mis amigos, que estuvieron presentes en mi proceso de formación profesional y personal.

Para todos gratitud y respeto por ayudarme en este proyecto de grado.

Maxiste Fabián Pacheco Monterrosa

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecemos a Dios por ser nuestra guía, por brindarnos sabiduría y paciencia para culminar con éxito todas las metas propuestas.

A los profesores del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico, quienes a través de su guía y enseñanza nos hicieron crecer como profesionales.

Especialmente agradecemos a nuestro director de tesis, el Ingeniero Javier Agustín Roldán Mckinley, por transmitirnos su conocimiento y experiencia, también por brindarnos su confianza, orientación y apoyo durante este proceso.

A nuestro codirector Eugenio Yime Rodríguez, por su tiempo, sus ideas, sus valiosas sugerencias y el apoyo constante para la realización de este proyecto.

PRESENTACIÓN

TÍTULO DEL PROYECTO:

MODELADO DINÁMICO DE UNA PLATAFORMA DIDÁCTICA STEWART-GOUGH CON CAPACIDAD DE CARGA DE 0.5KG.

DATOS DE LOS TESISTAS:

- **JAIME ANDRES BRAVO CASTRO**, tesista de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico.

- **MAXISTE FABIAN PACHECO MONTERROSA**, tesista de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico.

DATOS DEL DIRECTOR:

JAVIER AGUSTÍN ROLDÁN MCKINLEY, Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colombia), Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Puerto Rico (Puerto Rico, USA), Doctor en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Florida (Gainesville, EE.UU.).

DATOS DEL CODIRECTOR:

Eugenio Yime Rodríguez, Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad del Norte (Barranquilla, Colombia). Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes (Bogotá, Colombia). Doctor en Automatización y Robótica de la universidad Politécnica de Madrid, España.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN **1**
ABSTRACT **2**
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO **3**
1.1. ANTECEDENTES 3
1.2. OBJETIVOS 4
2. MARCO REFERENCIAL **5**
2.1 MARCO CONCEPTUAL 5
2.1.1 Métodos numéricos 5
2.1.2 Fundamentos en Robótica 5
2.1.3 Teoría de control 6
2.1.4 Plataforma Stewart 7
2.1.5 Actuadores 8
2.1.6 Juntas 9
2.1.7 Manipuladores 10
2.1.8 Tipos de Manipuladores 11
3.0 METODOLOGÍA **11**
3.1 DETALLES CONSTRUCTIVOS 12
3.2 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA 15
3.3 CRITERIOS DE SIMULACIÓN 26
4. RESULTADOS **29**
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... ¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **34**
REFERENCIAS **36**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. *Ilustración y elementos de una plataforma. Fuente: Los Autores* 8
Figura 2. *Isométrico y vista explosionada. Fuente: Los Autores*..... 14
Figura 3. *Verificación del plug-in. Fuente: Los Autores* 15
Figura 4. *Selección del plug-in adecuado. Fuente: Los Autores*..... 16
Figura 5. *Elección de sistema operativo para el plug-in. Fuente: Los Autores* 17
Figura 6. *Instalación del archivo comprimido. Fuente: Los Autores* 17
Figura 7. *Ejecución del complemento. Fuente: Los Autores*..... 17
Figura 8. *Verificación del plug-in instalado. Fuente: Los Autores*..... 18
Figura 9. *Exportación de CAD a MATLAB-Simulink . Fuente: Los Autores*..... 19
Figura 10. *Exportación de CAD correcta. Fuente: Los Autores*..... 19
Figura 11. *Ejecucción del archivo xml. Fuente: Los Autores* 20
Figura 12. Elementos exportados. Fuente: Los Autores..... 21
Figura 13. *Diagrama de bloques de la plataforma. Fuente: Los Autores*..... 21
Figura 14. *Parte inferior del robot del diagrama de bloques.Fuente:Los Autores*.. 22
Figura 15. *Parte media del robot del diagrama de bloques. Fuente: Los Autores*. 23
Figura 16. *Parte superior del robot del diagrama de bloques.Fuente:Los Autores* 24
Figura 17. *Ajuste de parámetros. Fuente: Los Autores* 25
Figura 18. *Parámetros a configurar. Fuente: Los Autores*..... 25
Figura 19. *Diagrama de bloque simplificado. Fuente: Los Autores* 26
Figura 20. *Parámetros iniciales. Fuente: Los Autores*..... 26
Figura 21. *Valores de ganancias. Fuente: Los Autores*..... 27
Figura 22. *Parámetros del solver. Fuente: Los Autores* 28
Figura 23. Trayectoria de la plataforma. Fuente: Los autores 31
Figura 24. Tiempo de convergencia de los solvers en 10 segundos. Fuente: Los autores 32
Figura 25. Tiempo de convergencia de los solvers en 5 segundos. Fuente: Los autores 32
Figura 26. Tiempo de convergencia de los solvers en 1 segundos. Fuente: Los autores 33
*Figura 27. Zoom de tiempo de convergencia de 1 segundo. Fuente: Los autores.*33

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Piezas de la plataforma. Fuente: Los Autores 13
Tabla 2. Características principales de los diferentes solvers disponibles en MATLAB-Simulink. (Fuente: Los Autores. Adaptado de [26])..... 30

RESUMEN

En este trabajo se discute el efecto de los diferentes solvers en las simulaciones de un controlador PID para una plataforma didáctica Stewart-Gough usando el toolbox MATLAB-Simulink. El modelo dinámico de la planta fue exportado al toolbox a partir de un modelo CAD de la plataforma creado en SolidWorks, previa validación de interferencias con un análisis de movilidad. Se comparó el efecto de diferentes solvers en el sistema de control en lazo cerrado con valores de ganancias establecidos mediante tanteo. Se mantuvieron constantes la trayectoria y los valores de ganancias en cada simulación, variando solo el solver en MATLAB-Simulink. El solver daesscSimscape mostró la mejor respuesta, mientras que el menos deseable fue ODE 15s debido a oscilaciones causadas por una baja precisión en los subintervalos de aproximación. Se recomienda evitar el uso de paquetes de aproximaciones numéricas con solvers de baja precisión en los subintervalos de aproximación. En su lugar, se sugiere optar por solvers que sean similares o derivados del algoritmo de Runge-Kutta.

Palabras clave: Stewart-Gough, Robótica paralela, solver, MATLAB-Simulink

ABSTRACT

In this work, the effect of different solvers on the simulations of a PID controller for a Stewart-Gough teaching platform using the MATLAB-Simulink toolbox is discussed. The dynamic model of the plant was exported to the toolbox from a CAD model of the platform created in SolidWorks, after validation of interferences with a mobility analysis. The effect of different solvers in the closed-loop control system was compared with gain values established by trial. The trajectory and gain values were kept constant in each simulation, varying only the solver in MATLAB-Simulink. The daesscSimscape solver showed the best response, while the least desirable was ODE 15s, due to oscillations caused by low precision in the approximation subintervals. It is recommended to avoid the use of numerical approximation packages with low precision solvers in the approximation subintervals. Instead, it is suggested to opt for solvers that are similar to, or derived from, the Runge-Kutta algorithm.

Keywords: Stewart-Gough, Parallel Robotics, solver, MATLAB-Simulink

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1. ANTECEDENTES

La plataforma Stewart-Gough es un robot paralelo o de cadena cerrada que está conformado por seis patas o actuadores con igual número de grados de libertad, muy usados para la simulación de sistemas mecánicos [1] tales como aviones, barcos, helicópteros, etc. [2]. La primera aparición de este robot se dio en el año 1940 por Dr. Willard quien presento un robot de cinco grados de movimiento cuya aplicación era pintura con spray [3], estos robots han sido diseñados para desplazar cargas de diferentes pesos tan grandes como unas toneladas. [1]. Para esto es necesario calcular la dinámica inversa del robot y así obtener las posiciones de los diferentes actuadores. En el año 1965 Doug Stewart en U.K difundió un artículo donde detallaba una plataforma de movimiento con seis grados de libertad y el uso de estos hexápodos [4] [5]. Siendo este robot de amplia aplicación en la industria, siendo la robótica un área que está en constante desarrollo debido a la alta demanda de producción y calidad que requieren tareas de alta repetición [5] [7].

La plataforma paralela es analizada por la mecánica de cuerpos rígidos para caso estático y dinámico, siendo esta última fundamentada en la cinemática y la cinética [10]. Para lograr una plataforma funcional se debe iniciar con el análisis cinemático y dinámico. En el caso de la cinemática, se estudia el movimiento del robot con respecto a un sistema de referencia, por ello el análisis cinemático es el encargado de la orientación, velocidad y aceleración del robot [6] [11]. Para entender a fondo el uso del robot paralelo Stewart-Gough, se requieren los conceptos de fuerza y momento [7] [12] para relacionar las cargas y torques en las patas con el movimiento deseado. [8]. Se han alcanzado resultados favorables en el modelado dinámico de dicha plataforma como lo es la predicción y comportamiento de los actuadores [9]. Existen numerosos métodos matemáticos para encontrar la orientación y posición de plataformas y robots, no obstante, los usos de estos métodos varían dependiendo a la aplicación deseada [9]. El método Newton- Euler planteado por Guo y Li los llevo a desarrollar ecuaciones de movimiento y dinámicas, en el caso de esta última se tomó el movimiento de la plataforma y el movimiento de los actuadores, analizando los brazos y la plataforma superior y excluyendo los componentes electromecánicos del mando [9][18]

Dada la importancia del actuador en consideración, las universidades suramericanas se han centrado en su estudio, diseño y aplicación. En el año 2008, David Izasa (Universidad de los Andes) construyó un robot paralelo Stewart- Gough para simulador dinámico en el entrenamiento de habilidades especificas [13]. Isaza diseñó el detalle de las uniones, articulaciones y actuadores, e hizo validación

experimental de los rangos de movimiento en la simulación y los rangos reales de la plataforma. En el año 2012, Juan Bolívar realizó un algoritmo para encontrar la geometría que mejor optimice la plataforma apoyándose en la trayectoria a recorrer, definió parámetros y variables para el modelo de optimización [16]. Para el año 2015, Francisco Villate diseñó y construyó un dispositivo para mecanizado multiejes, basándose en la arquitectura paralela Stewart-Gough con 5 grados de libertad, realizó el modelo geométrico haciendo uso del software NX 9.5 (SIEMENS), generando las trayectorias y sistema de control en MATLAB y MATLAB-Simulink respectivamente, obteniendo una maquina con márgenes de errores pequeños y potencial para su uso [17].

Posteriormente, López (2017) presentó el análisis dinámico de la plataforma Stewart-Gough para uso en el Telescopio San Pedro Mártir [14]. La tarea cinemática era la alineación y enfoque sostenido de los dos espejos del telescopio; realizo un método iterativo para caracterizar la plataforma encontrando la mejor configuración y desarrollo el modelo cinemático y dinámico de la plataforma Stewart-Gough. Más adelante, Cuadros et al. 2018 [15] diseñaron una plataforma Stewart-Gough para una carga de trabajo de 0,5kg con fines didácticos. Ellos establecieron las ecuaciones de cinemática inversa y directa de la plataforma para generar un modelo tridimensional en MATLAB, el cual también permitía la configuración de la geometría para verificación de dimensiones previo a la generación de planos de fabricación [15].

1.2. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Comparar el efecto de los tipos de métodos de aproximación numérica usado en el toolbox MATLAB-Simulink para modelar la planta dinámica de un robot Stewart-Gough con capacidad de carga de 0.5kg con fines didácticos bajo la acción un controlador tipo PID.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las propiedades físicas y geometría de los elementos constitutivos del robot Stewart-Gough.
- Construir un modelo CAD del robot Stewart-Gough en plataforma compatible con el toolbox MATLAB-Simulink para la generación automática del bloque modelo dinámico.
- Crear un modelo de bloques en MATLAB-Simulink que integre el bloque modelo dinámico como la planta a controlar y permita la evaluación de estrategias de control PID con diferentes métodos de aproximación numérica.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Métodos numéricos

Los métodos numéricos consisten en técnicas y algoritmos que se emplean para solucionar desafíos matemáticos y científicos a través de aproximaciones numéricas en lugar de soluciones analíticas precisas. Estas estrategias resultan indispensables cuando las soluciones exactas resultan inalcanzables o poco prácticas debido a la complejidad de las ecuaciones, geometrías complejas, modelos no lineales y ausencia de un método o ecuación concreta.

Estos métodos son utilizados en una diversidad de campos, que incluyen física, ingeniería, economía, biología, química y otras disciplinas científicas y técnicas. En muchas ocasiones, la ejecución de estos métodos demanda el uso de software y herramientas de programación, lo que resalta la importancia de poseer habilidades de programación y conocimiento en algoritmos para llevar a cabo de manera exitosa la aplicación de métodos numéricos, permitiendo aplicarlos en soluciones de sistemas de ecuaciones lineales y no lineales, geometrías complejas, análisis de movimientos.

Al convertir las matemáticas superiores en operaciones básicas facilita el análisis de fenómenos complejos, la correcta selección del método numérico a aplicar permite tener un margen de error tan pequeño que en algunos casos es despreciable, puesto que, no implicaría una repercusión demasiado grande en el caso de estudio, cabe aclarar que lo mencionado anteriormente depende totalmente del caso de interés, es decir, casos donde sea de vital importancia estar lo más cercano a la realidad se deben tener en cuanta.

2.1.2 Fundamentos en Robótica

La robótica constituye un ámbito interdisciplinario que engloba la concepción, edificación, funcionamiento y aplicación de robots. Estos dispositivos, que pueden ser programados y que contienen elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos, tienen la capacidad de ejecutar labores de manera autónoma o semiautónoma. La robótica engloba un amplio espectro de campos, abarcando áreas como la ingeniería mecánica, la electrónica, la informática y la inteligencia artificial, con la finalidad primordial de desarrollar máquinas capaces de llevar a cabo tareas de alta complejidad con eficiencia y precisión.[21]

La definición de robot que ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) define al robot industrial como un manipulador multifuncional programable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas [22]

Una de las definiciones más completas es la establecida por la Asociación francesa de normalización (AFNOR) quienes definen primero al manipulador y, basándose en esa definición sacan la del robot.

Manipulador: Mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado por un operador humano o mediante dispositivo lógico.

Robot: Manipulador automático servocontrolado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca, su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno.

Podemos observar en todas las definiciones anteriores que al robot se le ve como un brazo mecánico con la capacidad de manipulación, agarre y desplazamiento de objetos que incorpora un control más o menos complejo. Y observamos que un sistema robotizado es en cambio un concepto más amplio ya que engloba todos los dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano.

2.1.3 Teoría de control

La teoría de Control es definida por el campo de las ciencias que ayuda a diseñar modelos dependiendo de las señales que se presentan en un sistema dinámico para guiarlas a un punto que se desea, influyendo directamente en el comportamiento de dichos sistemas.

Teoría de Control Clásica La teoría de control clásica se encuentran limitadas al uso de sistemas que presentan una única entrada y una única salida, usando el algebra lineal, la transformada de Laplace y la función de transferencia para su estudio, haciendo introducción a los sistemas de control de lazo cerrado.

Teoría de Control Moderna. La teoría de control moderna puede ser usada en sistemas con señales multientradas y multisalidas, teniendo como base la representación de espacio de estado y el dominio del tiempo dando una vista más general de un sistema

Teoría de Control Robusta. La teoría de control moderna presenta un poco de inconveniente en la aplicación real, puesto que, su estabilidad depende de la realidad y su modelo, esto ocasiona que algunas veces no sea estable. Para evitar esto se define un rango de errores de tal forma que si llegase a incurrir a dicho criterio el sistema permanezca estable.

2.1.4 Plataforma Stewart

Una plataforma Stewart-Gough es un tipo de robot paralelo con seis grados de libertad. Se compone de un órgano terminal, denominado plataforma móvil, y un eslabón base, denominado plataforma fija, unidos por medio de seis cadenas serie las cuáles se accionan de manera independiente.

Estos robots son ampliamente utilizados en la industria con aplicaciones en varias operaciones, desde el empaquetado y ensamblaje de componentes hasta el mecanizado de piezas [23]. Más allá del ámbito industrial, es común encontrar este tipo de manipuladores siendo utilizados para la docencia y la investigación en universidades y laboratorios médicos.

Estos robots paralelos han ido acrecentando con el paso de los años el interés de la comunidad científica debido a su elevada rigidez, su alta precisión de posicionamiento, y su alta capacidad de carga, que los posicionan como una alternativa a los robots serie tradicionales [24].

En resumen, una plataforma Gough-Stewart es un robot de arquitectura paralela con 6 grados de libertad de gran aplicación en la simulación de movimientos de diferentes sistemas mecánicos: aviones, barcos, helicópteros, etc.

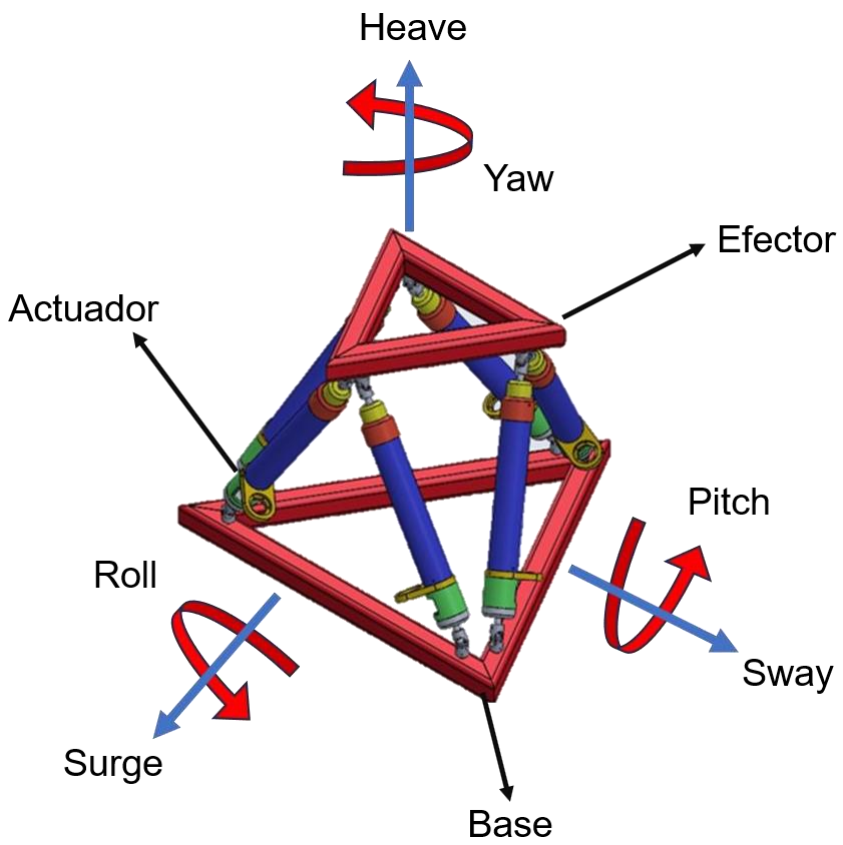


Figura 1. *Ilustración y elementos de una plataforma. Fuente: Los Autores*

2.1.5 Actuadores

Un actuador es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o "actuar" otro dispositivo mecánico. La fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: Presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). Dependiendo de el origen de la fuerza el actuador se denomina "neumático", "hidráulico" o "eléctrico"

Actuadores eléctricos: Estos dispositivos convierten una señal eléctrica en movimiento lineal o rotativo. Los motores eléctricos, como los motores de corriente continua (CC) y los motores de corriente alterna (CA), son ejemplos de actuadores eléctricos comunes.

Actuadores hidráulicos: Utilizan fluidos incompresibles, como aceite, para generar fuerza y movimiento. Los cilindros hidráulicos y las bombas hidráulicas son ejemplos de actuadores hidráulicos.

Actuadores neumáticos: Emplean aire comprimido para generar movimiento o fuerza. Los cilindros neumáticos y las válvulas neumáticas son ejemplos de actuadores neumáticos.

Los actuadores neumáticos y otros dispositivos neumáticos desempeñan un papel muy importante en las industrias modernas. Antes de la invención de los actuadores neumáticos modernos, se dependía mucho de las válvulas de accionamiento manual y las válvulas hidráulicas, que tenían muchas limitaciones y requerían mucho mayor mantenimiento en comparación con otras máquinas. Los actuadores modernos tienen un desempeño de acción rápido y un costo económico, brindando así la oportunidad de aumentar la producción y siendo convenientes para la industria.

2.1.6 Juntas

Una junta es una conexión entre dos o más eslabones dentro de una cadena cinemática que permite movimientos relativos entre sí, permitiendo diversos movimientos entre ellos desplazamientos, rotaciones, etc.

Revoluta: La junta revoluta permite una rotación relativa entre dos elementos, con 1 grado de libertad.

Esférica: La junta esférica permite 3 grados de libertad rotando en cada dirección de los ejes coordenados.

Prismática: La junta prismática es considerada completa porque permite un único grado de libertad, su movimiento es traslacional.

Universal (cardán): La junta universal o cardan no coaxial que transmite rotación desde un eje conductor a otro conducido.

Cilíndrica La junta cilíndrica permite rotación y también un movimiento de deslizamiento, brinda 2 grados de libertad.

Síntesis de mecanismos

La síntesis de mecanismos es una técnica dentro de la Teoría de Mecanismos y Máquinas en la cual se diseñan los mecanismos de tal forma que se describa una trayectoria deseada cumpliendo ciertos requisitos de rendimiento y movimiento. Implicando el seleccionar diversos componentes como engranajes, bielas, eslabones, juntas, además de tener en cuenta el análisis dinámico garantizando parámetros tales como velocidades, desplazamientos y las fuerzas y torques que actúan en dicho cuerpo.

2.1.7 Manipuladores

Un manipulador es un mecanismo formado por barras rígidas y articulaciones, unidos entre sí, que pueden ser programados para realizar una variedad de tareas, desde la fabricación y el ensamble hasta la carga y descarga de materiales en una línea de producción. [25]

Generalmente los manipuladores se fabrican con materiales escogidos cuidadosamente para proporcionar la resistencia, la durabilidad y la precisión, algunos de los materiales usados para su fabricación son: Aluminio, acero inoxidable y fibra de carbono, estos materiales tienen propiedades mecánicas y resistencia adecuada para soportar los movimientos repetitivos además son resistentes al desgaste y la corrosión.

Generalmente los manipuladores operan mediante la aplicación de fuerza, torque y movimiento controlado para manipular objetos y materiales en un entorno de trabajo específico. Un manipulador necesita una configuración adecuada para definir su espacio de trabajo, a esto se le conoce como grados de libertad, que hace referencia al número mínimo de movimientos independientes suficientes para definir dicha configuración [25].

Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 grados de libertad (g.d.l.), como las de soldadura, mecanizado y simulación, otras más simples requieren un menor número de g.d.l, como es el caso de un brazo robótico simple que necesita solo 3 grados.

2.1.8 Tipos de Manipuladores

Manipuladores Cartesianos: Estos robots tienen tres ejes lineales perpendiculares que se mueven en dirección horizontal, vertical y en profundidad. Ideales para aplicaciones de movimiento preciso en líneas rectas.

Manipuladores Cilíndricos: Estos robots tienen al menos un eje rotativo vertical y brazos extensibles. Son adecuados para tareas que requieren un alcance variable y la capacidad de girar objetos.

Manipuladores Esféricos o Polares: Estos robots utilizan coordenadas esféricas o polares para controlar su movimiento. Tienen un brazo de rotación vertical y un brazo de rotación horizontal, lo que les permite una mayor versatilidad en términos de movimiento y alcance.

Manipuladores SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm): Estos robots tienen dos ejes de rotación paralelos y uno vertical que permite movimientos rápidos y precisos en un plano horizontal. Son comunes en aplicaciones de ensamblaje.

Manipuladores Paralelos: Estos robots utilizan varios actuadores conectados en paralelo para controlar una plataforma móvil. Son conocidos por su alta precisión y capacidad de carga.

3. METODOLOGÍA

El proyecto empieza con la determinación de las propiedades físicas y geométricas de interés del robot didáctico Stewart-Gough mostrado en [15]. Se deben conocer las propiedades físicas, geometría y los actuadores que hacen parte de la plataforma para realizar un modelo CAD en SolidWorks. Seguido, el modelo se exportará a Simscape Multibody dentro de MATLAB-Simulink para crear un robot virtual que facilite la visualización durante las simulaciones.

Los modelos matemáticos desarrollados son llevados a diagramas de bloques en MATLAB-Simulink para ser integrados en la ley de control. Los modelos dinámicos serán comparados mediante la visualización de la salida de la plataforma en el espacio de la tarea. Para ello se desarrollan los diagramas de bloques que

representen cada ley de control tipo PID y poder cerrar los lazos de control en cada caso. El ajuste de ganancias se obtiene por tanteo, variando una ganancia a la vez en la estrategia de control. Ello resulta en un escenario para comparación de distintos métodos de aproximación numérica en el modelo dinámico con una ley de control. Las simulaciones se documentarán en figuras que podrá ser utilizado por los estudiantes posteriormente en prácticas de control de movimiento del robot educativo.

3.1 DETALLES CONSTRUCTIVOS

Para el diseño estructural de la plataforma se utilizó como base el diseño propuesto en la tesis de Alexander Cuadros, Daniel Ramírez y Jorge Barrera [15]. Para el proyecto se realizaron modificaciones que ayudaron a la funcionalidad de la plataforma, las modificaciones realizadas se hicieron en el software de SolidWorks.

Se presenta a continuación la tabla de cada una de las piezas individuales hechas en el software SolidWorks.

NOMBRES Y ESQUEMA 3D DE LAS PIEZAS DEL PROTOTIPO

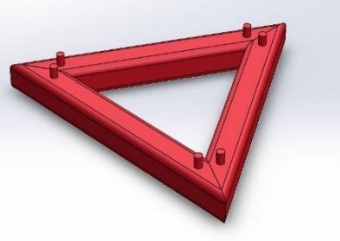
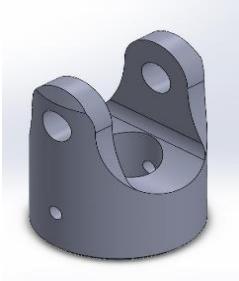
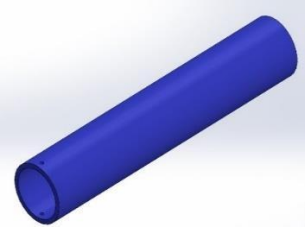
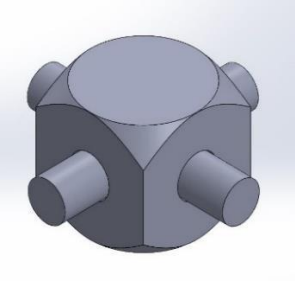
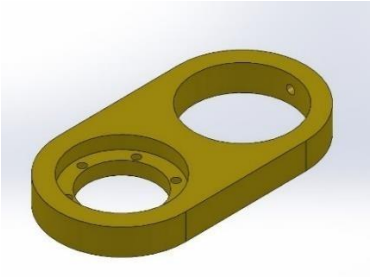
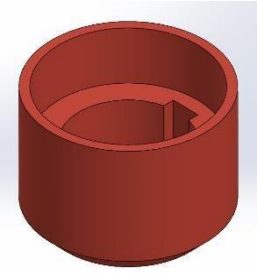
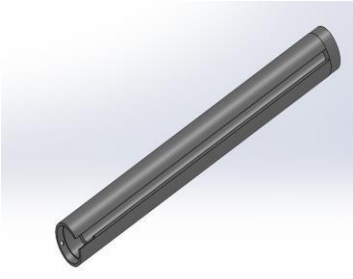
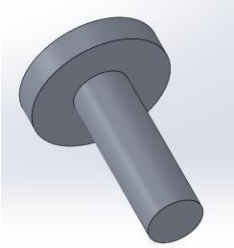
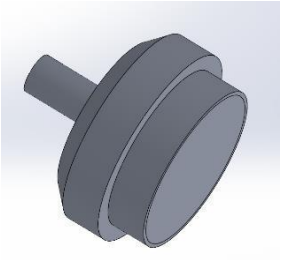
 BASE INFERIOR	 **BASE PISTON**	 **EFECTOR**
 **CARDAN**	 **CILINDRO EXTERIOR**	 **CUBO CARDAN**
 **SOPORTE MOTOR**	 **TAPA CILINDRO ACTUADOR**	 **PISTON**
 **PIN DE SUJECION**	 **TAPON BASE PISTON**	**USILLO**

Tabla 1: Piezas de la plataforma. Fuente: Los Autores

La Figura 2 muestra el ensamble final de la plataforma, con todos sus componentes enumerados, su cantidad, vista explosionada de la plataforma y el cajetín con los nombres de las piezas mostrados en la tabla 2.

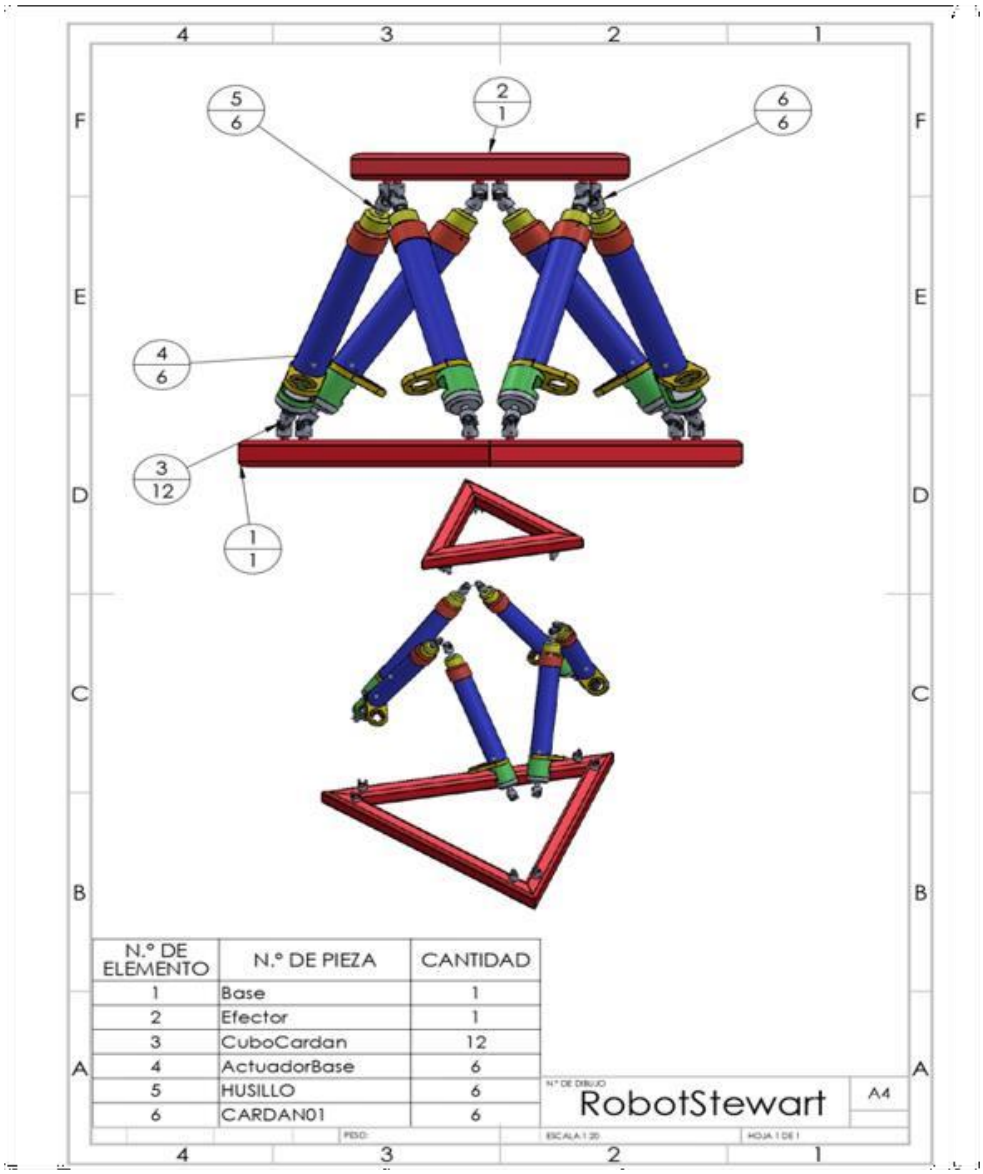


Figura 2. *Isométrico y vista explosionada. Fuente: Los Autores*

3.2 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA

Una vez culminada la realización del diseño del robot elaborado mediante el software SolidWorks, se procede a exportar el archivo a MATLAB-Simulink usando el plug-in Simscape Multibody (anteriormente SimMechanics). Para lograr esto se realizó una serie de verificaciones e instalaciones que garanticen el traslado correcto de información entre ambos softwares.

En una primera instancia se verifica si el plug-in se encuentra instalado en SolidWorks. La Figura 3 muestra que hace falta la instalación del plug-in. Esto requirió realizar la descarga directamente de la página oficial de MathWorks, como se muestra el plug-in adecuado en la Figura 4, en la cual se buscó el complemento requerido verificando que fuese compatible.

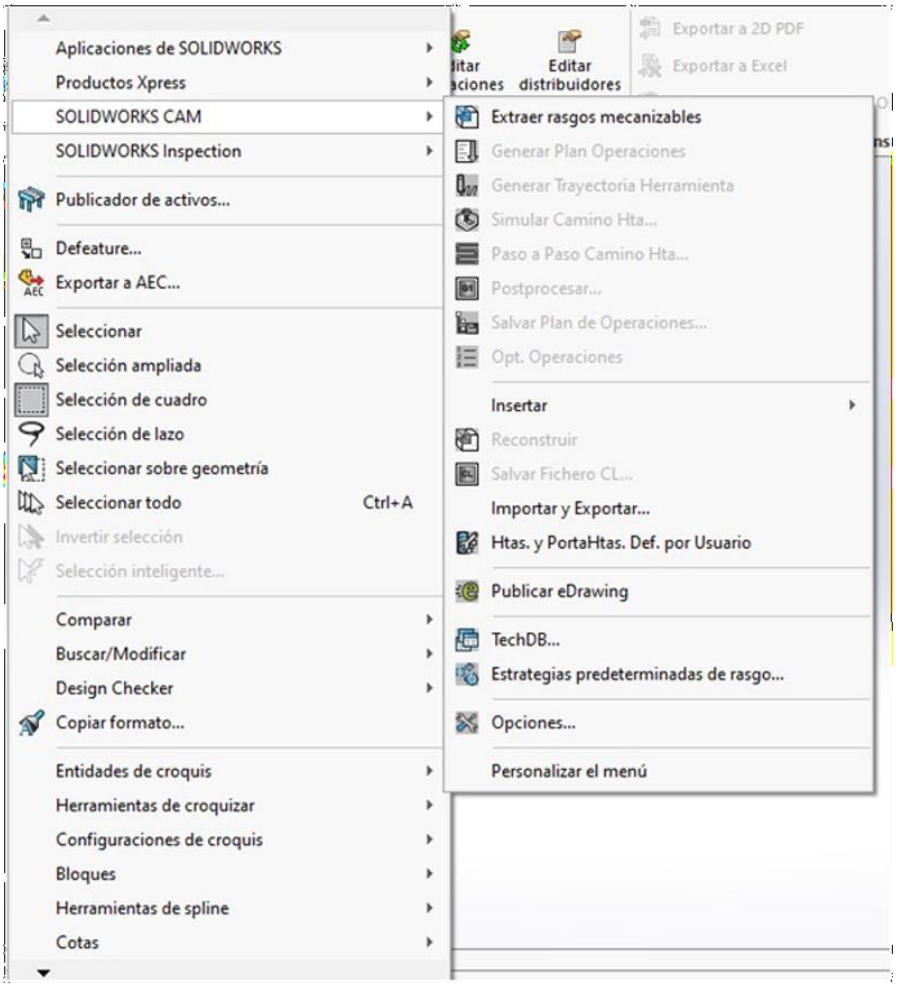


Figura 3. *Verificación del plug-in. Fuente: Los Autores*

A continuación, se selecciona el plug-in Simscape Multibody link 6.1 – Release 2019a, relacionado en la Figura 4, el cual cumple con los requisitos para la versión utilizada de MATLAB la cual permite la simulación de la dinámica del modelado 3D previamente realizado.

Figura 4. *Selección del plug-in adecuado. Fuente: Los Autores*

Continuando con el proceso de instalación, se selecciona el elemento comprimido como se muestra en la Figura 5, y se escribe "install_addon" en la ventana de comando, como se observa en la Figura 6, lo que posibilita la ejecución del archivo mencionado.

Simscape Multibody Link 6.1 – Release 2019a (Simscape Multibody 6.1)

Simscape Multibody 6.1	
Win64 (PC) Platform	smlink.r2019a.win64.zip install_addon.m
UNIX (64-bit Linux)	smlink.r2019a.glnxa64.zip install_addon.m
Mac OS X (64-bit Intel)	smlink.r2019a.maci64.zip install_addon.m

Figura 5*. Elección de sistema operativo para el plug-in. Fuente: Los Autores*

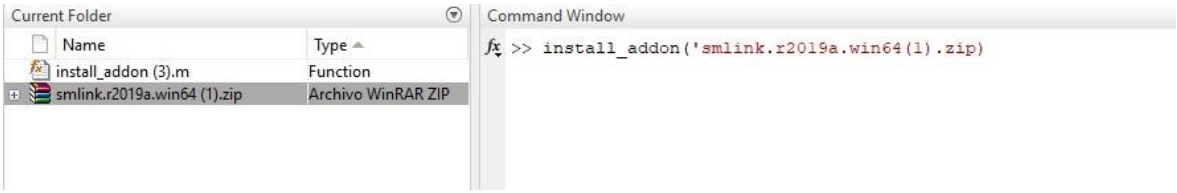


Figura 6*. Instalación del archivo comprimido. Fuente: Los Autores*

Después de ejecutar MATLAB en calidad de administrador, se procede a realizar la ejecución del comando "smlink_linksw", tal como se detalla en la Figura 7. Este proceso tiene como objetivo obtener el complemento listo para su ejecución.

Figura 7*. Ejecución del complemento. Fuente: Los Autores*

Para concluir la secuencia de instalación, se verifica en la interfaz de SolidWorks, en el área de complementos que se encuentre visible el Simscape Multibody y que pueda ser usado con normalidad. Una vez confirmada esta configuración, se procede a la exportación desde el software SolidWorks a MATLAB-Simulink mediante la generación de un archivo XML.

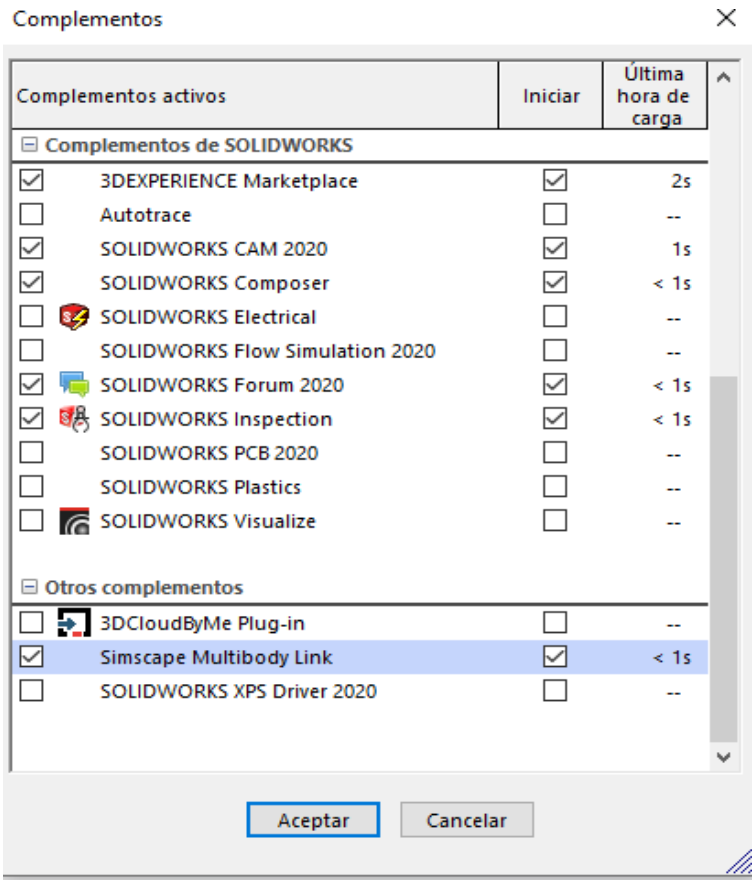


Figura 8. *Verificación del plug-in instalado. Fuente: Los Autores*

La exportación se llevó a cabo accediendo al menú de herramientas y seleccionando el recién instalado plug-in Simscape. En este punto, se despliega un menú secundario que posibilita la exportación del CAD a MATLAB-Simulink, como se ilustra en la captura de pantalla de la Figura 9.

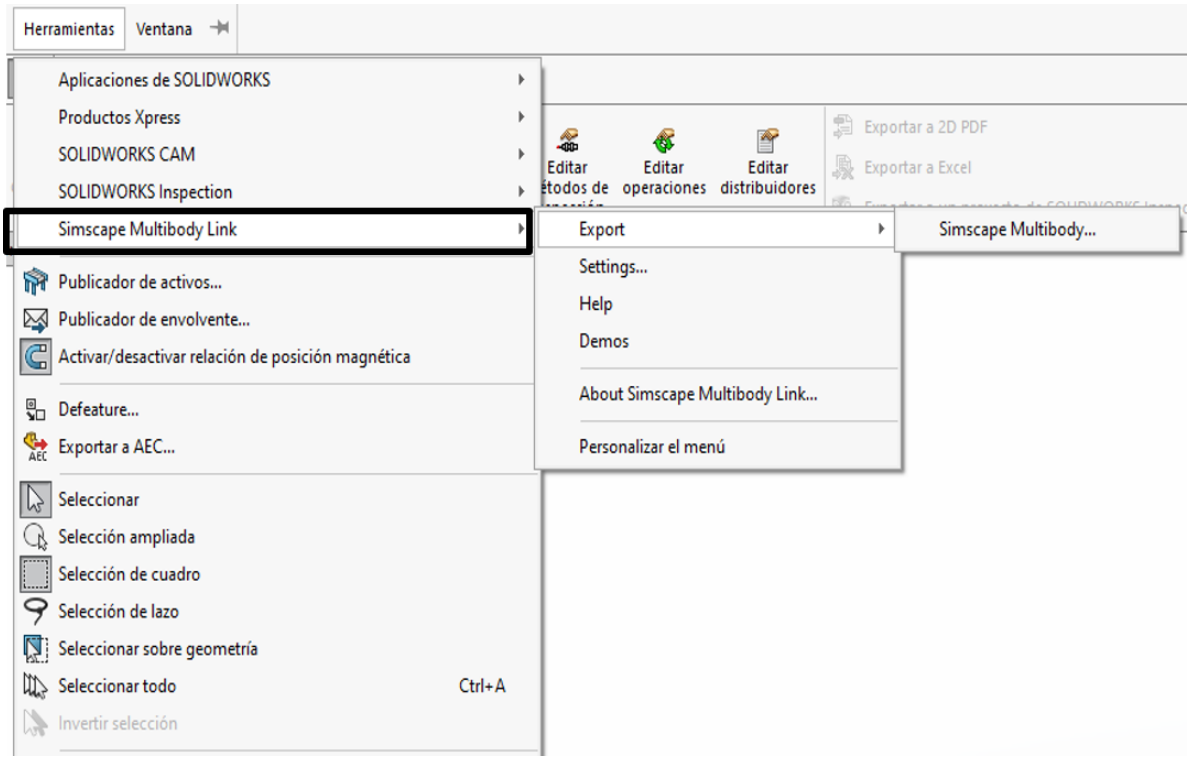


Figura 9. *Exportación de CAD a MATLAB-Simulink. Fuente: Los Autores*

Es importante tener en cuenta que esta operación puede tomar algunos minutos, y la duración variará según la complejidad del mecanismo o pieza que se esté exportando. Cuanto más complejo sea el archivo, mayor será el tiempo necesario para completar el proceso. Una vez que el programa concluye la operación, aparecerá un cuadro de diálogo indicando que se ha completado exitosamente. El archivo resultante al finalizar es de tipo XML, seguido se abre automáticamente MATLAB round time y una vez finalice los procesos pendientes es posible cerrar sin afectar los archivos

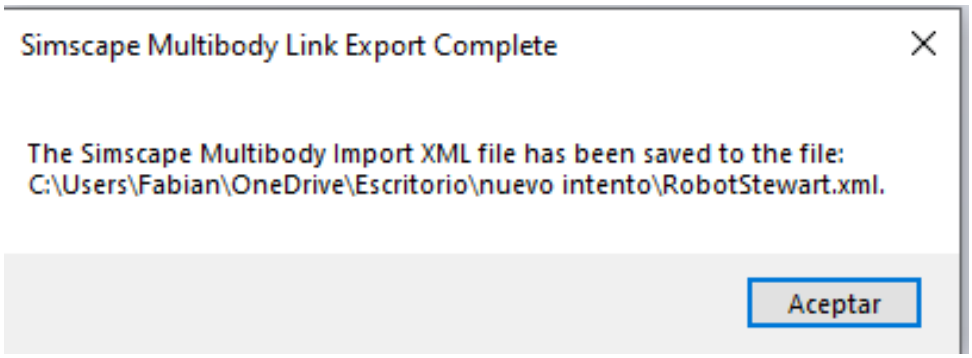


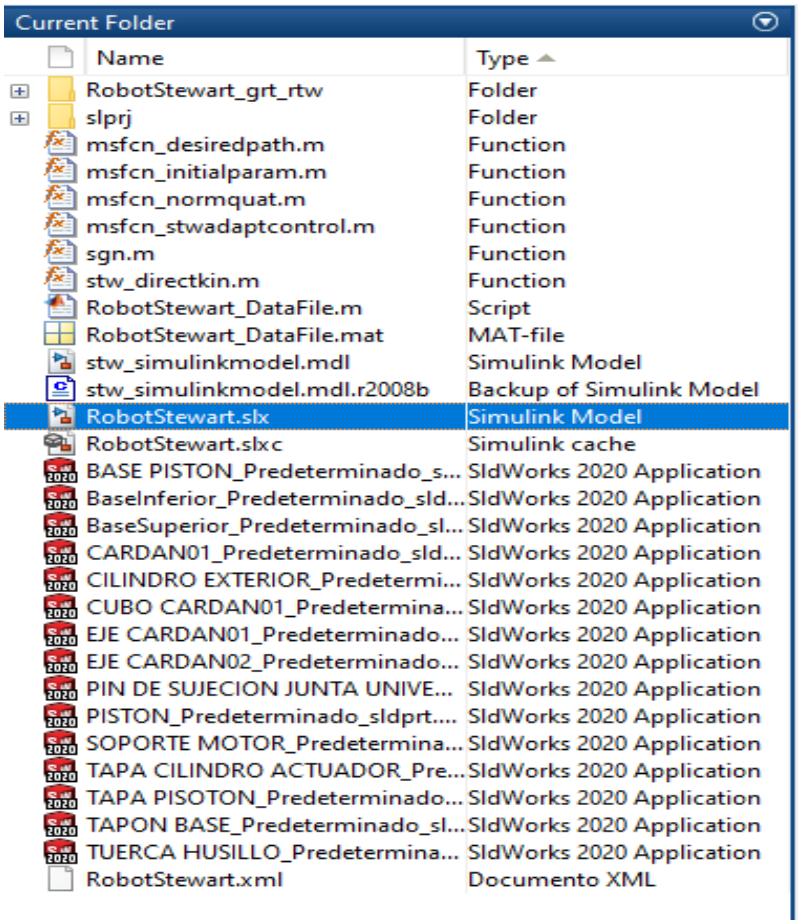
Figura 10. *Exportación de CAD correcta. Fuente: Los Autores*

Luego de la ejecución del proceso, se genera un archivo tipo sldprt por cada pieza realizada y el archivo XML del mecanismo, se debe usar el comando mostrado en la Figura 11.

```
Command Window
fx >> smimport('RobotStewart.xml')
```

Figura 11. *Ejecucción del archivo xml. Fuente: Los Autores*

A continuación, el software genera un modelo en MATLAB-Simulink y un archivo con extensión ".m", el cual finaliza con "DataFile". En las Figuras 12 y 13 se presentan tanto el modelo de MATLAB-Simulink como los archivos con extensión ".m", respectivamente. Este último archivo tendrá todas las configuraciones del mecanismo, correspondientes a su rotación, traslación y posición. El modelo generado incluye su propio bloque de configuración, permitiendo especificar las condiciones de trabajo del mecanismo de acuerdo con su uso particular. Se aprecia la creación de un bloque para cada pieza en el CAD, representando así cada componente del ensamblaje, ver Figura 16, donde se identifican la base inferior, las juntas inferiores y los actuadores base.



Current Folder

Name	Type
RobotStewart_grt_rtw	Folder
slprj	Folder
msfcn_desiredpath.m	Function
msfcn_initialparam.m	Function
msfcn_normquat.m	Function
msfcn_stwadaptcontrol.m	Function
sgn.m	Function
stw_directkin.m	Function
RobotStewart_DataFile.m	Script
RobotStewart_DataFile.mat	MAT-file
stw_simulinkmodel.mdl	Simulink Model
stw_simulinkmodel.mdl.r2008b	Backup of Simulink Model
RobotStewart.slx	Simulink Model
RobotStewart.slxc	Simulink cache
BASE PISTON_Predeterminado_s...	SldWorks 2020 Application
BaseInferior_Predeterminado_sld...	SldWorks 2020 Application
BaseSuperior_Predeterminado_sl...	SldWorks 2020 Application
CARDAN01_Predeterminado_sld...	SldWorks 2020 Application
CILINDRO EXTERIOR_Predetermi...	SldWorks 2020 Application
CUBO CARDAN01_Predetermina...	SldWorks 2020 Application
EJE CARDAN01_Predeterminado...	SldWorks 2020 Application
EJE CARDAN02_Predeterminado...	SldWorks 2020 Application
PIN DE SUJECION JUNTA UNIVE...	SldWorks 2020 Application
PISTON_Predeterminado_sldprt....	SldWorks 2020 Application
SOPORTE MOTOR_Predetermina...	SldWorks 2020 Application
TAPA CILINDRO ACTUADOR_Pre...	SldWorks 2020 Application
TAPA PISOTON_Predeterminado...	SldWorks 2020 Application
TAPON BASE_Predeterminado_sl...	SldWorks 2020 Application
TUERCA HUSILLO_Predetermina...	SldWorks 2020 Application
RobotStewart.xml	Documento XML

Figura 12. Elementos exportados. Fuente: Los Autores

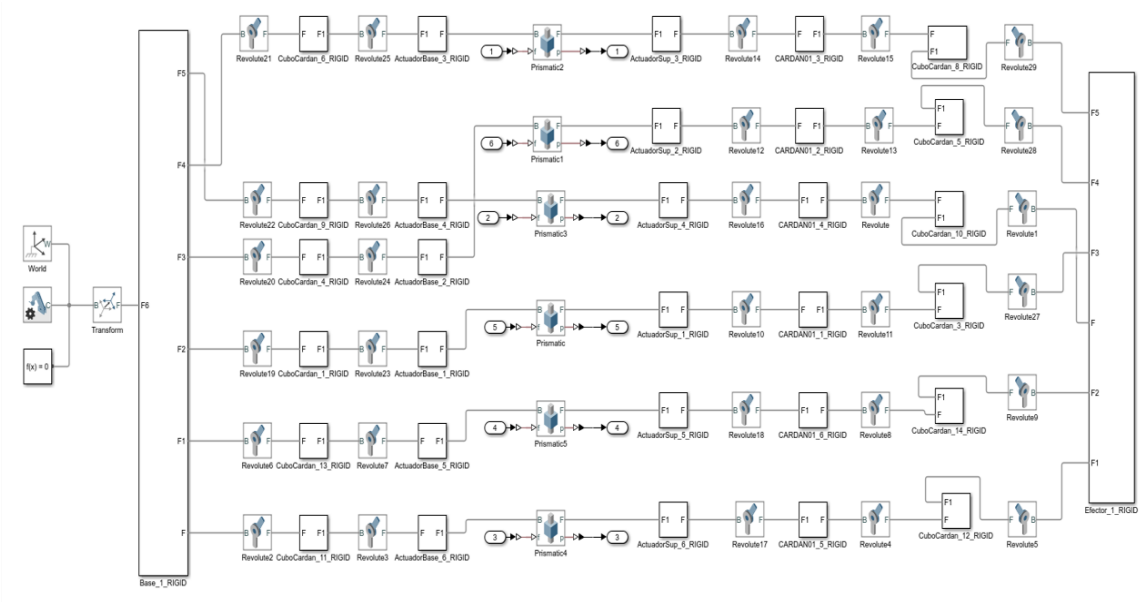


Figura 13. *Diagrama de bloques de la plataforma. Fuente: Los Autores*

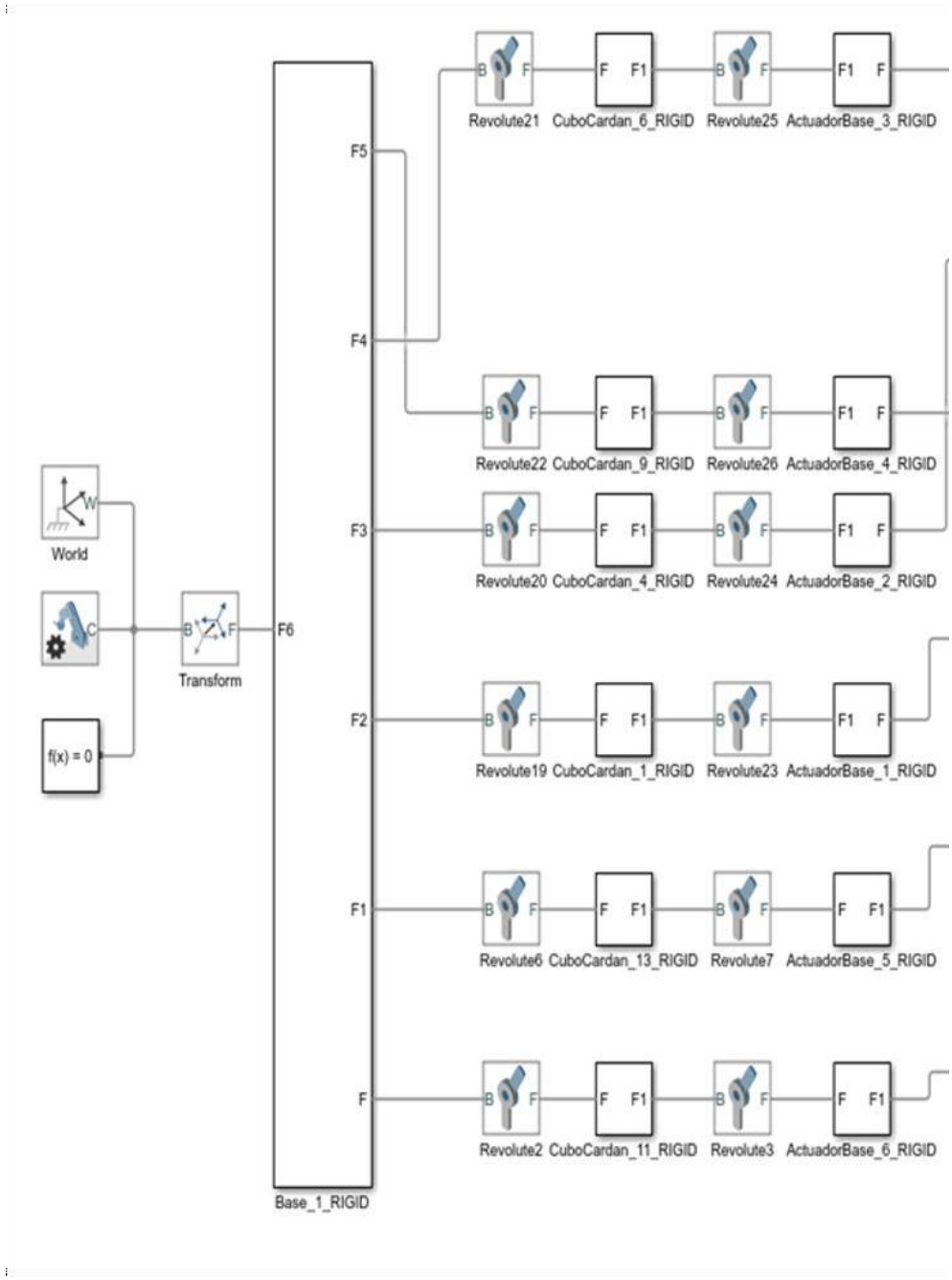


Figura 14*. Parte inferior del robot del diagrama de bloques. .Fuente: Los Autores*

En la Figura 15, por su parte, se pueden visualizar las juntas prismáticas, la parte superior del actuador y las uniones de los actuadores con el efector, mientras que en la Figura 16 se muestra las juntas superiores y el efector final del robot. Dentro del modelo en MATLAB-Simulink, es posible realizar ajustes personalizados a cada componente.

El software permite configurar individualmente haciendo click sobre el componente, corroborando las condiciones respectivas de cada uno y aplicando los cambios que sean necesarios para su correcto funcionamiento. Esto va a depender de las condiciones que se requieran al momento de correr la simulación.

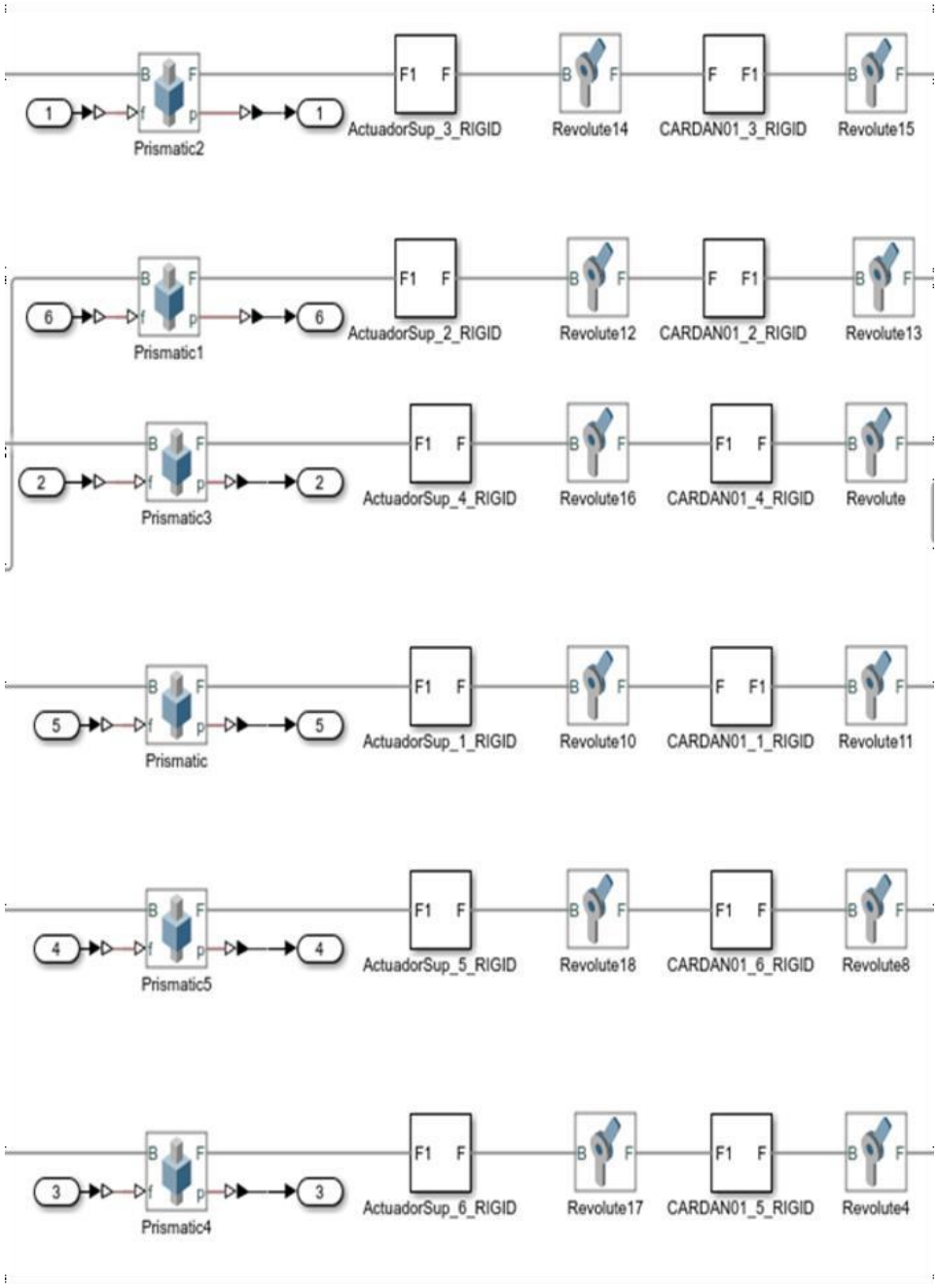


Figura 15. *Parte media del robot del diagrama de bloques. Fuente: Los Autores*

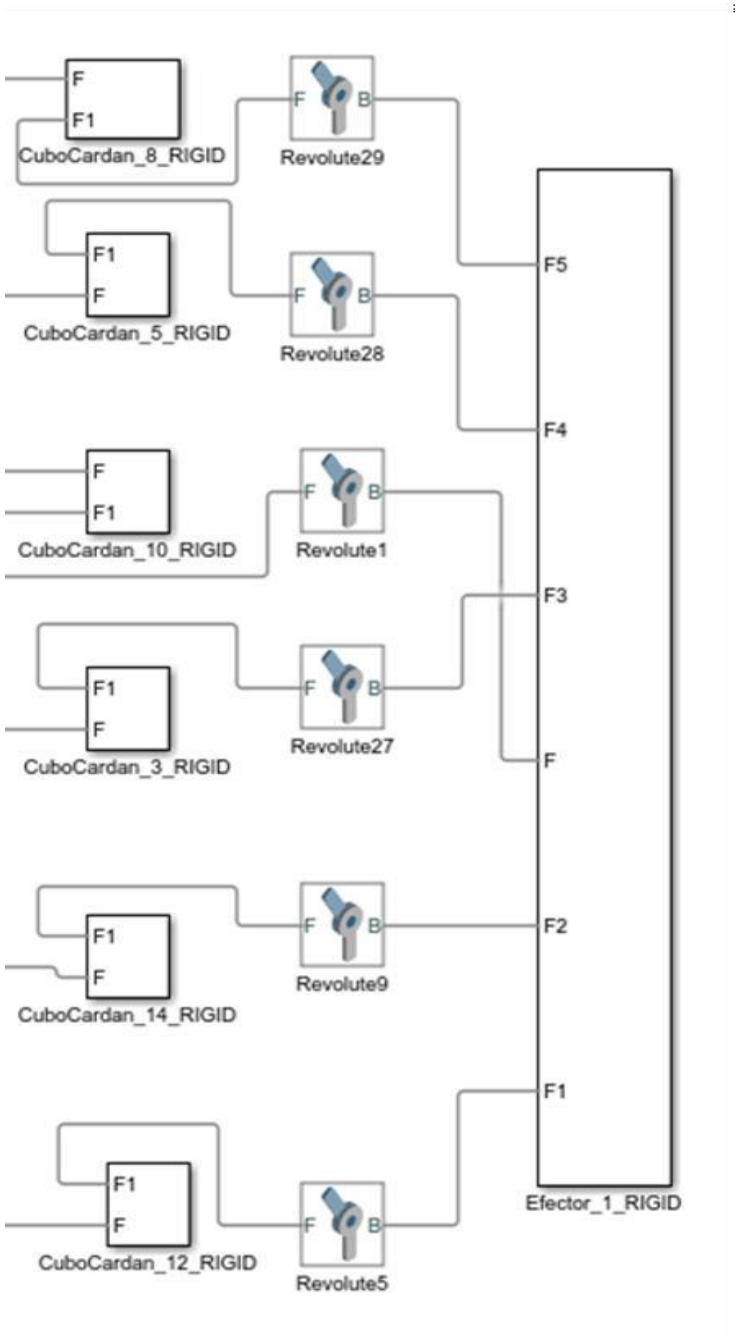


Figura 16*. Parte superior del robot del diagrama de bloques. Fuente:Los Autores*

En la Figura 17 se observa los marcos de referencia, los ajustes de gravedad, los ajustes de tolerancia del solver y las matrices de transformación, creadas a partir de la exportación. Al hacer click sobre cualquier componente del diagrama de bloques se despliega una ventana que muestra todos los parámetros posibles para configurar, tal como se muestra en la Figura 18.

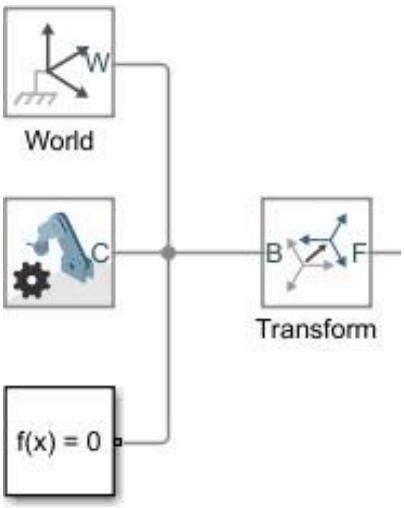


Figura 17. *Ajuste de parámetros. Fuente: Los Autores*

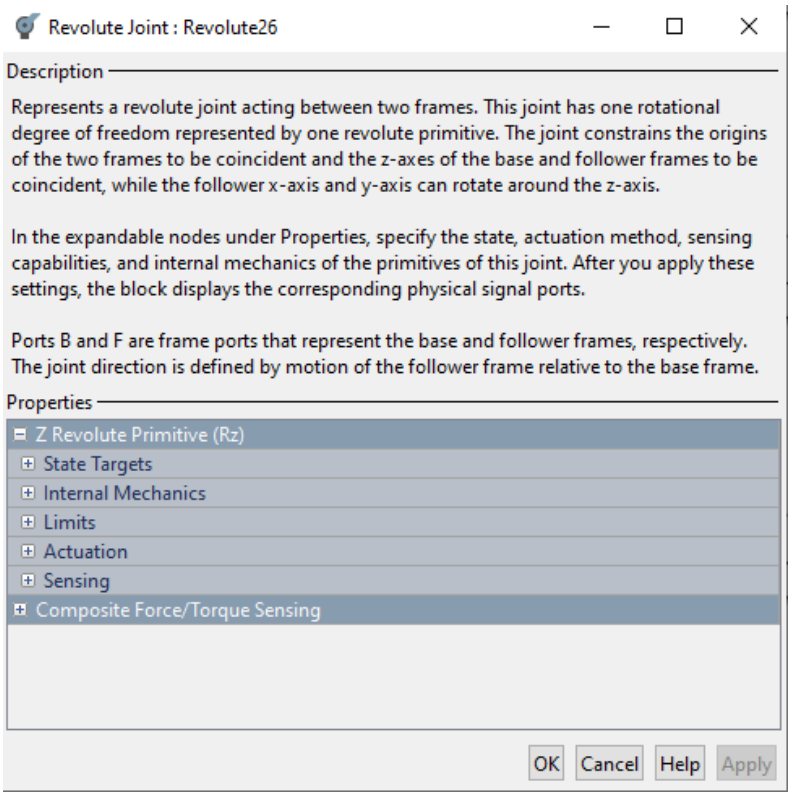


Figura 18. *Parámetros a configurar. Fuente: Los Autores*

Tras estos pasos, se llevó a cabo la organización de los bloques con el objetivo de facilitar la gestión de la simulación y hacerla más intuitiva. Se procedió a implementar un sistema de control de lazo cerrado para mejorar su funcionamiento.

Posteriormente, se obtuvo un esquema general del proyecto, reflejado en la figura 19, que proporciona una visión integral de la estructura y el funcionamiento del sistema desarrollado.

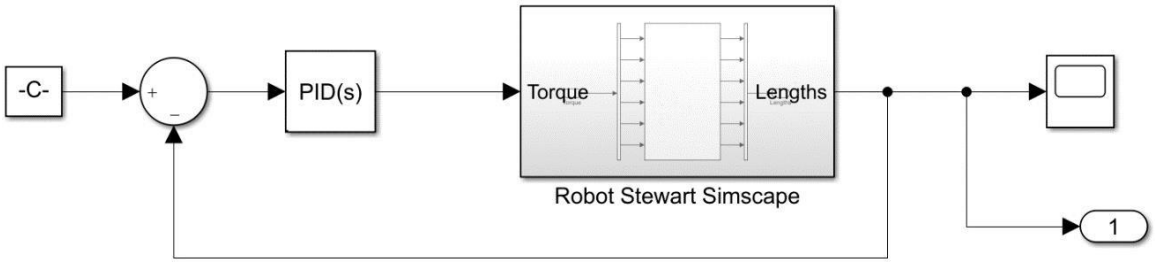


Figura 19. *Diagrama de bloque simplificado. Fuente: Los Autores*

3.3 CRITERIOS DE SIMULACIÓN

Con base en la no linealidad de la planta del modelo dinámico del robot Stewart-Gough, hecho ampliamente reportado en literatura [1] [12] [19], es aparente que las técnicas de control lineal no son adecuadas para el diseño del controlador PID seleccionado. Sin embargo, con asistencia del paquete MATLAB-Simulink se ejecutaron diversas pruebas iterativas de ensayo y error; en cada iteración, se analizaba el comportamiento de la variable de salida a lo largo del tiempo, con el propósito de ajustar y mejorar el desempeño del controlador PID en el contexto de la no linealidad del sistema. Para dar inicio a las pruebas e iteraciones pertinentes, se establecieron en primera instancia los valores de entrada del sistema. En la Figura 20 se presenta el valor de entrada, establecido en un escalón de magnitud [0, 0, 0.010] m.

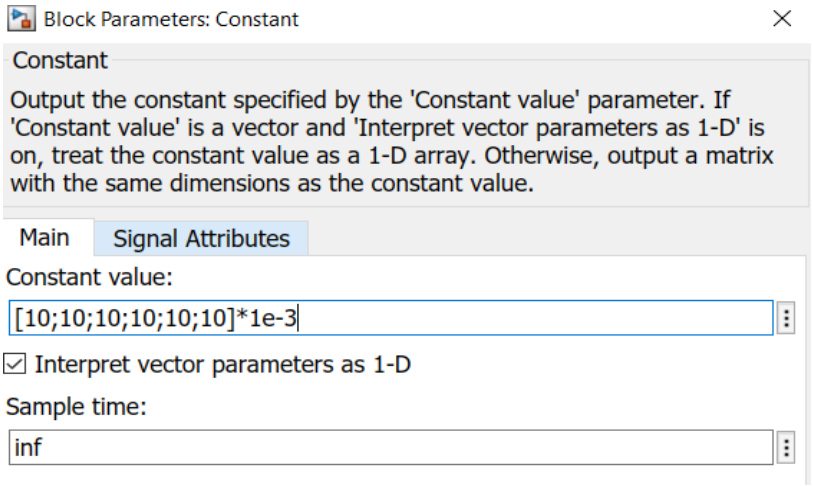


Figura 20. *Parámetros iniciales. Fuente: Los Autores*

Después de establecer los valores de los parámetros iniciales, se asignaron ciertos valores de ganancias para observar su comportamiento. En la Figura 21, se presentan los valores óptimos de ganancia para este controlador, los cuales fueron determinados después de realizar pruebas y ajustes con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema bajo el controlador PID seleccionado.

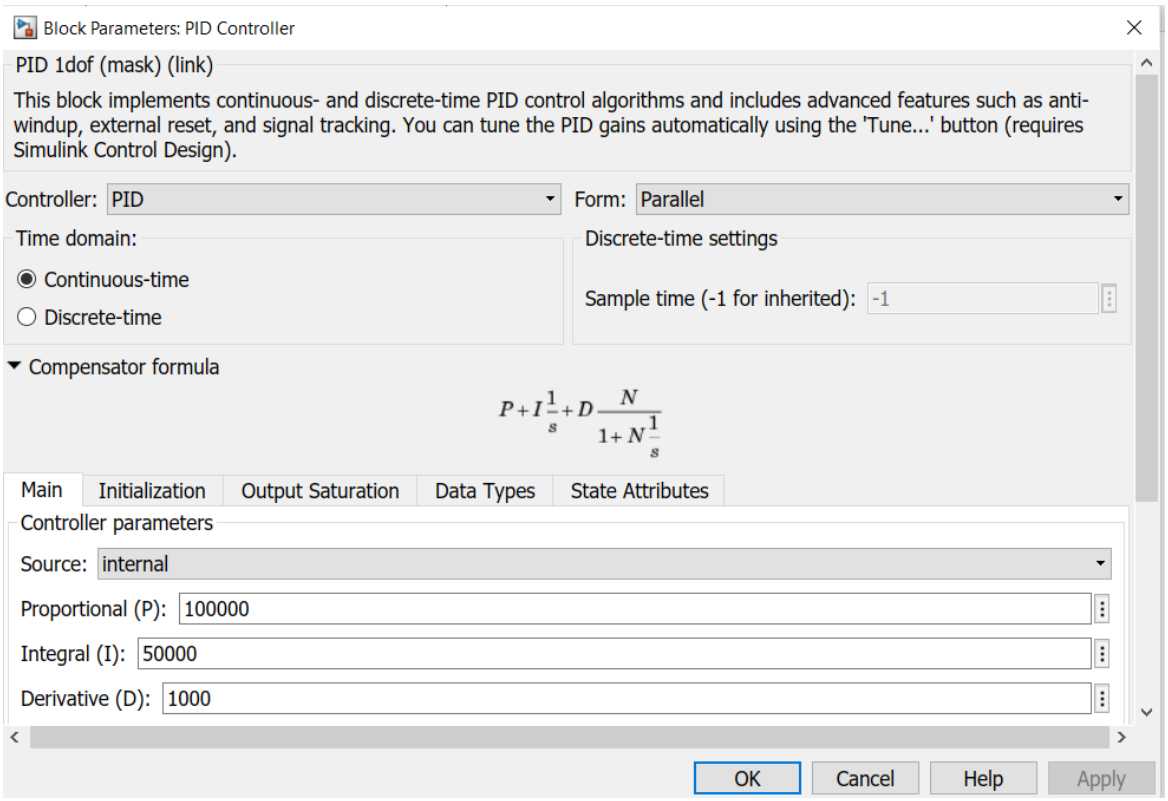


Figura 21. *Valores de ganancias. Fuente: Los Autores*

Con los parámetros mostrados anteriormente, se logra garantizar la estabilidad del sistema; sin embargo, aún no se han establecido condiciones que permitan una consistencia uniforme en las simulaciones. Por lo tanto, en una primera instancia, es necesario realizar ajustes preliminares en el software para asegurar la armonía total de la simulación y minimizar al máximo los posibles ruidos y perturbaciones que puedan surgir durante la ejecución. Esto no solo contribuye a la estabilidad del sistema, sino que también facilita la evaluación individual de cada método al trabajar en condiciones equitativas. Se considerarán los parámetros y detalles específicos que se mencionarán más adelante para cumplir con este objetivo.

Para realizar la configuración se accede a los criterios de selección de solver mostrada en la Figura 22, en la ventana es posible observar el cuadro que especifica el tipo de intervalo que actuará sobre el espacio de estado y en ella se selecciona la opción variable-step, esto con el fin de mejorar la simulación debido a que se reduce el tamaño de los intervalos cuando se requiere mayor precisión (cambios

bruscos en el espacio de estado) y los aumenta en los casos que requieran evitar cálculos innecesarios (cambios lentos en el espacio de estado). Se hace necesario recalcar que el éxito de la ejecución dependerá de en gran medida de la capacidad de procesamiento de la computadora, por ende, esta opción puede ser útil para agilizar los procesos en equipos de baja capacidad y garantizar resultados más certeros en equipos de mayor capacidad. Otra alternativa que se puede utilizar es la de tipo fixed-step la cual no adapta los intervalos y solo los hace con el valor dado por la persona que analiza la simulación, este puede ser óptimo para simulaciones sencillas en las que se haga la consideración que no existan discontinuidades en el proceso o que no presente una carga significativa para el análisis.

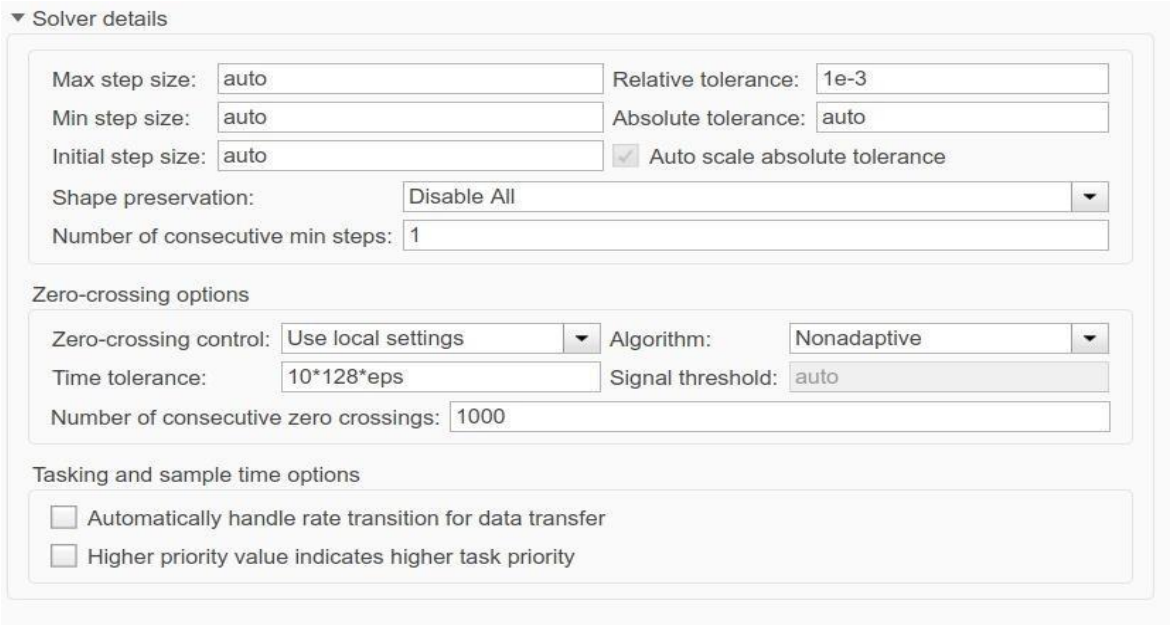


Figura 22. *Parámetros del solver. Fuente: Los Autores*

En cuanto a la simulación, el tamaño del step o intervalo de análisis se usa en modo automático, y cada solver o método de solución escogido en MATLAB-Simulink adapta los intervalos de análisis incrementando, disminuyéndolo e iniciando donde sea necesario. La tolerancia relativa establece el error aceptable en el solver, sugiriendo el tamaño de cada intervalo, si el primero excede esta tolerancia entonces el solver reduce el tamaño del step en el tiempo. En cada step el solver realiza las siguientes funciones:

- Calcula el valor de cada estado
- Estima el error en el cálculo de cada estado
- Determina el error aceptable para cada estado utilizando la tolerancia absoluta, relativa y los valores de estado.

El error aceptable e_i es calculado por el software internamente en cada intervalo de las iteraciones siguiendo la ecuación:

$$e_i = t_r|x|, \quad (1)$$

t_r es la tolerancia relativa, y |x| es el valor del estado en un instante determinado. Generalmente esto se hace con la tolerancia absoluta, pero al escoger el solver automático, se ajustaría a los requerimientos necesarios para llevarla a cabo, en dado caso no se cumpla esta condición el software realiza el paso mostrado anteriormente.

Otros aspectos a tener en cuenta son las discontinuidades que se presentan en el espacio de estado debido a la no linealidad de la planta. Se sabe que existen puntos donde matemáticamente no está definido, lo que genera saltos cuyo tamaño se ajusta dependiendo de las discontinuidades o cambios presentes en el espacio de estado. Estos saltos ayudan a propagar perturbaciones en el análisis del sistema. Además, es común que se produzcan muchos cruces por cero al intentar que la señal converja al valor deseado, lo que también contribuye a la perturbación del sistema.

Para abordar adecuadamente estos desafíos, es importante seleccionar la opción de paso variable (variable-step) en MATLAB-Simulink. Esta configuración es rigurosa en cuanto a las discontinuidades y los cruces por cero, lo que permite una simulación más precisa del sistema. Además, se debe prestar atención a los bloques que por defecto permiten modificar su paso de simulación, ya que esto puede ayudar a mejorar el uso de recursos computacionales, aunque aumente el tiempo de simulación

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en las consideraciones presentadas, se examina la guía ofrecida por MATLAB-Simulink para la selección de solvers de acuerdo con las condiciones en el sistema. Es recomendable iniciar con el solver "auto" (Selección Automática de Solver) [26], puesto que esta opción adapta automáticamente las condiciones, sin importar el margen de error seleccionado. El software puede ajustarlo dinámicamente según sus criterios. Conocer el método numérico específico utilizado permite una selección más informada que se adapte mejor a cada sistema, especialmente cuando se prepara un control robusto.

Es importante tener en cuenta que la elección del solver depende de la necesidad de soluciones rígidas o no [26]. Esto se puede identificar en las representaciones en el espacio de estados, donde diferentes familias de soluciones varían en sus rangos de solución. Matemáticamente, este proceso puede ser complejo, pero se puede lograr a través de pruebas y errores iterativos. Cuando se requiere rigidez en la solución, el solver debe ser escogido cuidadosamente [26]. Utilizar un solver inadecuado resultará en un mensaje de error que indica que no es posible encontrar una solución, producto de la convergencia de la aproximación numérica. En casos en los que no se requiere un control robusto y el objetivo principal es observar el

impacto de los métodos numéricos en las posibles soluciones, se pueden emplear solvers no rígidos. La Tabla 2 resume las características y métodos de los solvers disponibles en MATLAB-Simulink utilizados en la simulación.

Solver	Método	Características
Solver Automatic	Seleccionado internamente	Selección automática del método de solución adecuado. Simplifica el proceso de selección de solver.
Solver ODE 45	Dormand-Price	Método de Runge-Kutta de quinto orden (RK5). Control de error adaptativo. Preciso y robusto. Poca eficiencia computacional.
Solver Ode 23	Bogacki-Shampine	Precisión alta a pesar de ser un método de segundo y tercer orden. Robustez basada en lo adaptativo.
Solver Ode 113	Adams	Adaptable y eficiente con razonable precisión y rendimiento.
Solver ODE 15s	Stiff-NDF	Eficiente y robusto diseñado específicamente para abordar sistemas de ecuaciones diferenciales.
Solver ODE 23s	Stiff/mod. Rosenbrock	Adecuado para sistemas rígidos y no rígidos de ecuaciones diferenciales. Ajuste automático del tamaño del paso de integración.
Solver Ode 23t	Mod/stiff. Trapezoidal	Adecuado para sistemas rígidos de ecuaciones diferenciales.
Solver Daessc	DAE solver for Simscape	Adecuado para sistemas de ecuaciones diferenciales algebraicas. Predeterminado para modelos físicos creados en Simscape.

Tabla 2. Características principales de los diferentes solvers disponibles en MATLAB-Simulink. (Fuente: Los Autores. Adaptado de [26])

El modelo en bloques de MATLAB-Simulink desarrollado se usó para simular una tarea cinemática de trayectoria lineal del centro de masa de la plataforma, a partir de la posición inicial [0, 0, 0] m, hasta la posición final [0, 0, 0.01] m; es decir, un desplazamiento vertical (eje z) ascendente de 0.010 m, como se ilustra en la Figura 23, en el marco de referencia local o de la herramienta. Se realizaron varias simulaciones para la misma trayectoria, diferenciando el tipo de solver escogido cada vez, como se muestra en la Figura 24 para un tiempo de simulación de 10 segundos, en donde se ha incluido un acercamiento de comportamiento de perturbaciones en dos subintervalos de la trayectoria para el solver “ODE 15s”.

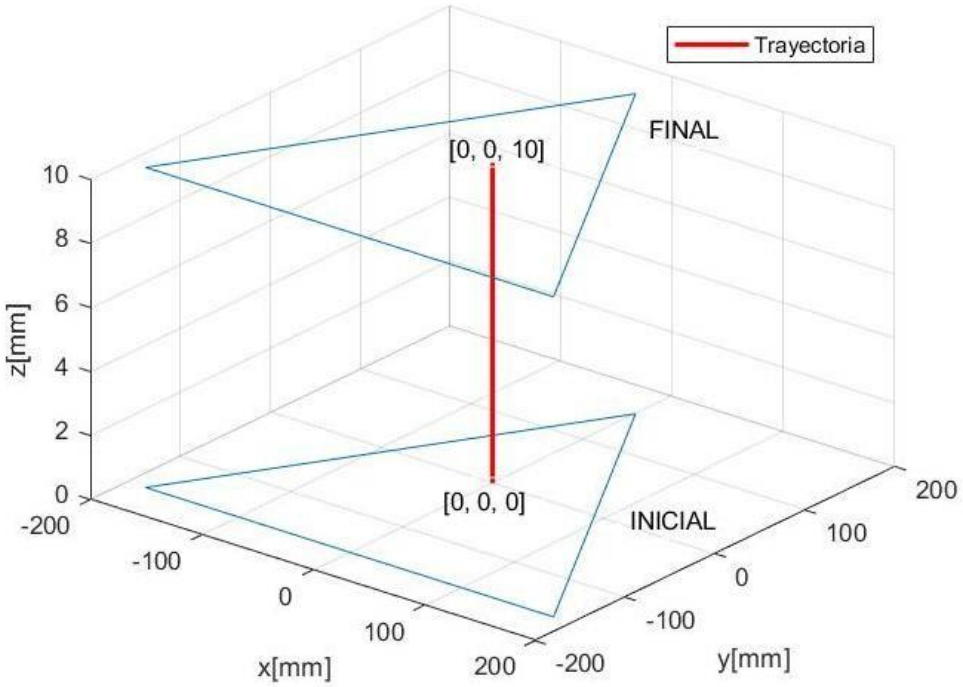


Figura 23. Trayectoria de la plataforma. Fuente: Los autores.

A continuación, se ejecutaron nuevamente las simulaciones para un tiempo de simulación de 5 segundos, resultando en lo mostrado en la Figura 25; ello con el propósito de un mejor acercamiento de las perturbaciones mostradas anteriormente. Se observa que permanece la perturbación del subintervalo [0.3, 0.7] s con el solver “ODE 15s”, pero no se muestra la perturbación cerca de 3 segundos de simulación.

Finalmente, se vuelven a ejecutar las simulaciones para un tiempo final de 1 segundo de simulación, y permanece la perturbación más marcada del solver “ODE 15s”, como se aprecia en la Figura 26, con un acercamiento de la perturbación en la Figura 27.

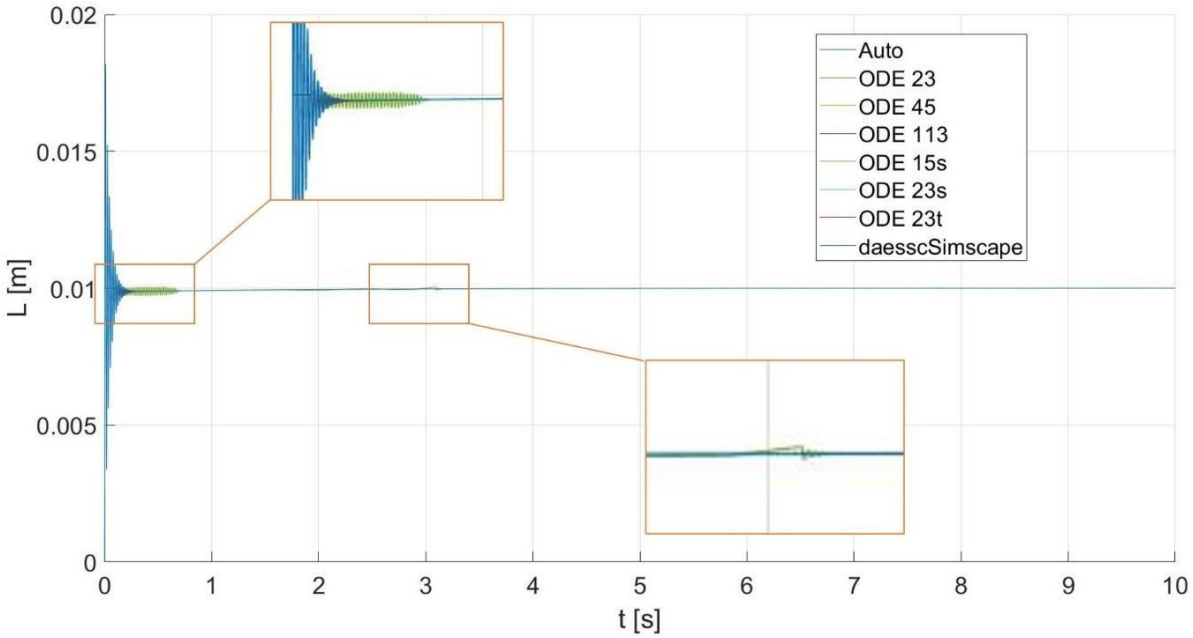


Figura 24. Tiempo de convergencia de los solvers en 10 segundos. Fuente: Los autores.

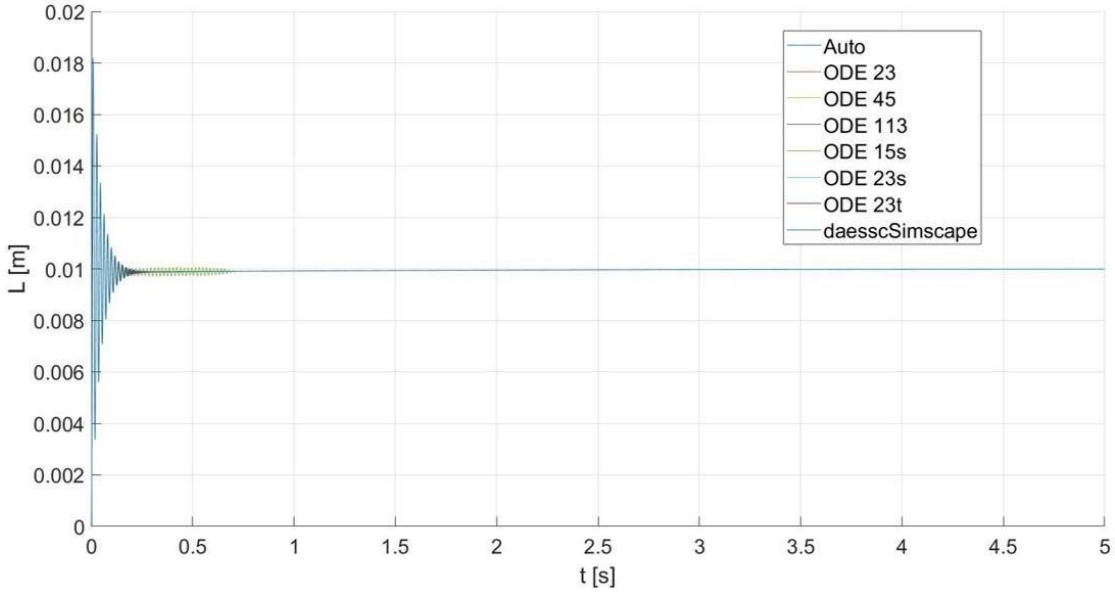


Figura 25. Tiempo de convergencia de los solvers en 5 segundos. Fuente: Los autores.

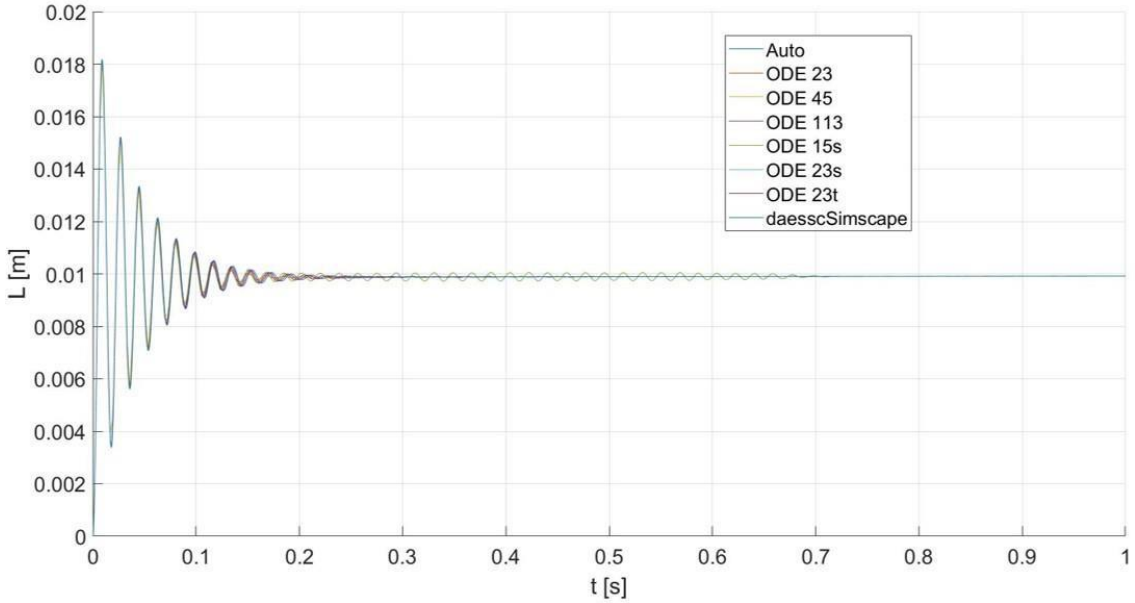


Figura 26. Tiempo de convergencia de los solvers en 1 segundos. Fuente: Los autores.

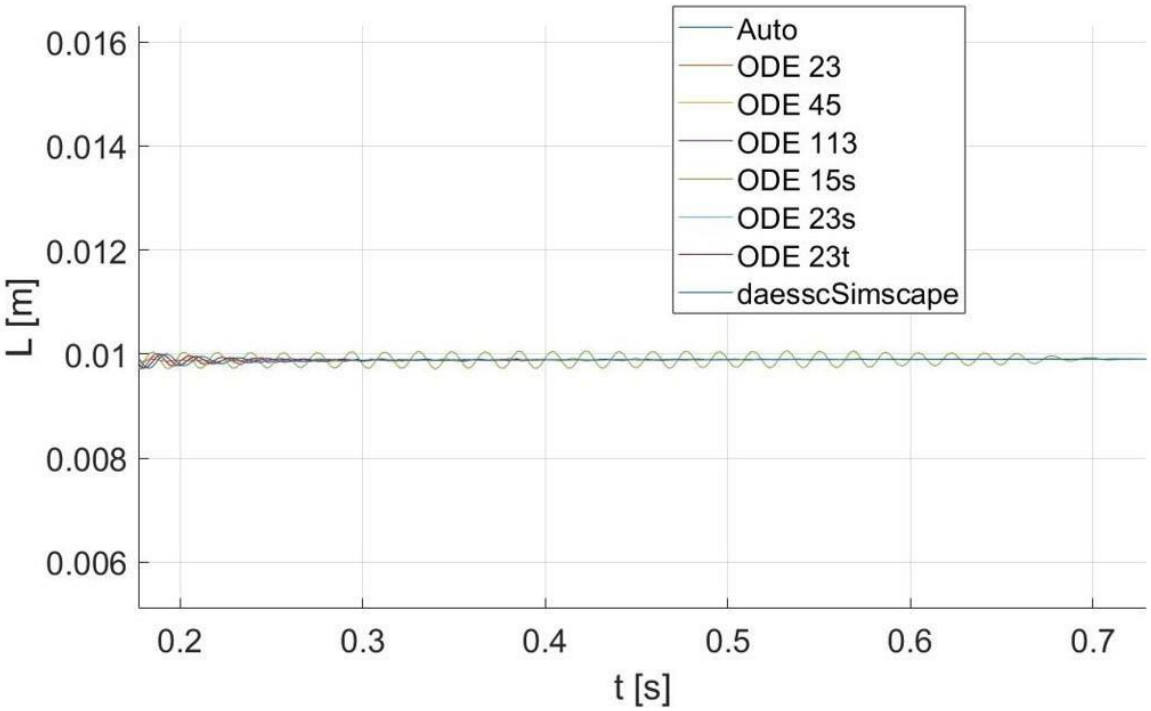


Figura 27. Zoom de tiempo de convergencia de 1 segundo. Fuente: Los autores.

Finalmente, se observa cómo los diferentes métodos de aproximación numérica inciden en la respuesta del sistema, aún para la misma tarea.

En la Figura 24, el sistema presenta una oscilación indeseada hasta cerca de 0.7 s para el solver ODE 15s, lo cual se explica dada la baja precisión del método de aproximación (Stiff-NDF) afectada por los cambios de paso en la frontera de los subintervalos del tiempo de aproximación. Similarmente, la anomalía en la salida de la longitud de pata mostrada en la misma figura cerca de los 3 s, se asocia a la escasez de memoria de cómputo para el intervalo de simulación de 0 a 10 s. Al acortar el intervalo de simulación de 0 a 5 s, Figura 25, esta perturbación desaparece dado que los recursos se destinan a un menor intervalo, y se requiere de menos operaciones y memoria exigida [26]. Las perturbaciones propias de los métodos de aproximación se comparan en las Figuras 26 y 27, encontrando mínimas discrepancias en el estado transitorio de las respuestas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se discutió el efecto de las diferentes opciones de paquete solver en las simulaciones de un controlador Proporcional-Integral-Derivativo usando un diagrama de bloques de MATLAB-Simulink. Inicialmente se creó un modelo CAD en SolidWorks para una plataforma Stewart-Gough dimensionada para una carga de trabajo de hasta 0.5 kilogramos, donde las patas las define una junta helicoidal que permite relacionar movimiento rotacional de entrada de los actuadores en un cambio en la dimensión de las mismas que resulta en variación de la altura del efector. En este modelo CAD, las propiedades físicas, de masa y de geometría se generan a partir de la correcta selección de dimensiones y adecuada asignación de materiales, y validados con un análisis de movilidad exitoso para una carrera vertical de 25 mm del efector.

A continuación, se exportó el modelo CAD a la plataforma MATLAB-Simulink, adicionando los complementos necesarios a cada software usado. Para la plataforma de partida, SolidWorks, fue instalado el plug-in Simscape Multibody en su versión 6.1, y para MATLAB-Simulink, como plataforma de destino, se requirió de la instalación del complemento incluido. De esta manera se generaron los bloques correspondientes a cada elemento de la plataforma con sus correspondientes matrices de transformación que garantizaron la correcta interacción cinemática de los elementos, tomado el punto muerto inferior de la plataforma, horizontal, como la posición de configuración inicial.

Para efectos de comparación del efecto del solver escogido, se integró el bloque plataforma como planta a controlar dentro de un lazo de control de sensor unitario y controlador Proporcional Integral Derivativo cuyos valores de ganancias se establecieron por tanteo, para una trayectoria vertical de la herramienta (plataforma superior). Se mantuvieron constantes la trayectoria y valores de ganancias para cada simulación realizada, y en cada una se cambió el tipo de solver disponible en MATLAB-Simulink. La mejor respuesta en las simulaciones se obtuvo con el solver daesscSimscape, el cual es la opción por defecto de MATLAB-Simulink para aproximaciones de modelos dinámicos de sistemas mecánicos. El desempeño menos deseable se obtuvo para el caso del solver ODE 15s, donde se presentó una oscilación explicada por poca precisión en los subintervalos de aproximación.

A partir de los resultados de este trabajo, se puede concluir que para trabajos futuros de implementación de controladores de la plataforma Stewart-Gough se deben evitar paquetes de aproximaciones numéricas con solvers de precisión baja en las aproximaciones de los subintervalos. En su defecto, de deben escoger solvers que se asemejen o se hayan derivado del algoritmo Runge-Kutta.

REFERENCIAS

[1] L. Tsai, "Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators". John Wiley & Sons, Inc, 1999.

[2] M. Orihuela, “Diseño de un mecanismo paralelo tipo plataforma de seis grados de libertad de apoyo móvil para un simulador de entrenamiento de conductores de automóviles,” Tesis de pregrado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.

[3] L. Willard, Position-controlling apparatus. US Patent 2,286,571. 1942.

[4] D. Stewart, “A Platform with Six Degrees of Freedom.” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 180, no. 1, June 1965, pp. 371–386, doi:10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02.

[5] W. Bolton, Mecatrónica: Sistemas de Control Electrónico para Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 5ta ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010.

[6] A. Barrientos and L. F. Peñin, Fundamentos de Robótica, 2da ed. Madrid: McGraw-Hill, 2007.

[7] R. C. Limon, “Modelo Matematico de un Robot Paralelo de Seis Grados de Libertad,” May 2006. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/cisneros_l_r/indice.html.

[8] M. A. Díaz, S. E. Provenzano, M. J. Vergara, y R. D. Chacón, “Dinámica directa de robots paralelos utilizando las ecuaciones de Gibbs-Appell,” Inf. Tecnol., vol. 18, no. 4, pp. 75–82, 2007, http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S071807642007000400011&script=sci_arttext.

[9] C. S. Anchante Guimaraes, “Modelación y simulación dinámica del mecanismo paralelo tipo plataforma de Stewart-Gough usado en un simulador de marcha,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.

[10] D. Ramírez. “Diseño de una plataforma robótica paralela de 6 DOF para asistente quirúrgico en cirugías de reconstrucción cráneo-facial”. Tesis Doctoral. Tesis M. Sc., Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010.

[11] B. Dasgupta and T. S. Mruthyunjaya, “Stewart platform manipulator: A review,” Mech. Mach. Theory, vol. 35, no. 1, pp. 15–40, 2000. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094114X99000063.

[12] R. N. Jazar, Theory of Applied Robotics, Kinematics, Dynamics and control, 2nd ed., New York: Springer, 2010.

[13] D. Isaza, “Diseño y construcción de un robot paralelo (Plataforma de Stewart),” Tesis de Pregrado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Uniandes, Bogotá, Colombia, 2008. Disponible en: https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23815/u325617.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[14] A. López, “Análisis dinámico de la plataforma Gough-Stewart del TSPM.” Tesis de especialización, Posgrado Interinstitucional de ciencia y tecnología, Queretano, México 2017 Disponible en: https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1024/313/1/M-AALM-2017.pdf.

[15] A. Cuadros, D. Ramírez, y J. Barrera. “Diseño estructural de un robot paralelo Stewart-Gough para carga de trabajo de 0.5kg con fines didácticos” Tesis de Pregrado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2018.

[16] J. D. Bolivar, “Desarrollo de un modelo de optimización para una plataforma Stewart,” Tesis de Pregrado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogota, Colombia, 2012.

[17] F. J. Villate, “Diseño y construcción de prototipo para mecanizado multiejes en materiales blandos utilizando arquitectura paralela Stewart-Gough,” Universidad Nacional de Colombia, 2015.

[18] H. B. Guo and H. R. Li, “Dynamic analysis and simulation of a six degree of freedom Stewart platform manipulator,” Dep. Mech. Eng. Autom. Sch. Mech. Electr. Eng. Harbin Inst. Technol. Harbin, People’s Repub. China, vol. 220, no. 1, pp. 61–72, 2006, doi: 10.1243/095440605X32075.

[19] H. Taghirad, Parallel robots Mechanics and control, 1st ed., vol. 1. London, 2013.

[20] R. Oftadeh, M. M. Aref, and H.D. Taghirad. Explicit dynamics formulation of Stewart-Gough platform: A Newton- Euler approach. In Proc. of the IEEE Int. Conf. IROS, pp. 2773–77, Taiwan, Oct. 2010.

[21] C. Siegel, C. Breazeal, and M. Williams, "The Next Generation of Robotics: From Industrial Robots to Robotic Companions," Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, vol. 1, pp. 383-403, 2018.

[22] A. Barrientos, L. F. Peñín, C. Balaguer, y R. Aracil, "Fundamentos de Robótica, 2ª ed., McGraw-Hill, 1997.

[23] J. Gallardo Alvarado, J.M. Rico Martínez, y H. Orozco Mendoza, "Un algoritmo para resolver la cinemática directa de plataformas Gough-Stewart tipo 6-3," Computación y Sistemas, vol. 8, no. 2, pp. 132-149, 2004.

[24] Solución de la cinemática directa de la plataforma Gough-Stewart, Revista Internacional de Métodos Numéricos en Cálculo y Diseño en Ingeniería, Disponible en: https://www.elsevier.es/es-revista-revista-internacional-metodos-numericos-calculo-338-articulo-solucion-cinematica-directa-plataforma-gough-stewart-S0213131512000478.

[25] Ingenimundo, "Robótica Industrial - Introducción a los Manipuladores Robóticos," [Video en línea]. June 9, 2019. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=BE6UTMiPpPc&list=PLAXGnzG45eNWsLsGurrfJI6O8SOEtc0qD&index=1&ab_channel=ingenimundo.

[26] MathWorks, "Choose a Solver," MATLAB-Simulink Documentation. https://la.mathworks.com/help/MATLAB-Simulink /ug/choose-a-solver.html