Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Integración de software especializado para el diseño y análisis dinámico de prototipos ingenieriles

Specialized software integration for the design and dynamical analysis of engineering prototypes

Xopo-Rodríguez, B.L.[a], Brizuela-Mendoza, J.A.[b]*, Astorga-Zaragoza, C.M.[a], Rumbo-Morales, J.Y.[c], Pérez-Sabino, S.P.[d]

[a] Departamento de Ingeniería Electrónica, Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos 62490, México.
[b] Departamento de Ciencias Exactas y Metodologías, Centro Universitario del Sur de la Universidad de Guadalajara, Ciudad Guzmán, Jalisco 49000, México.
[c] Departamento de Ciencias Computacionales e Ingenierías, Centro Universitario de los Valles de la Universidad de Guadalajara, Ameca, Jalisco 46600, México.
[d] Departamento de Ciencias de la Ingeniería. Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos 62490, México.
m22ce068@cenidet.tecnm.mx; jorge.brizuela@cusur.udg.mx*; astorga@cenidet.edu.mx; jesse.rumbo@academicos.udg.mx; patricia.ps@cenidet.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Integración de software especializado.
El área de aplicación industrial: Análisis dinámico para prototipos ingenieriles.

Recibido: 08 diciembre 2023
Aceptado: 16 julio 2024

Abstract

In current times, progress in science and technology is manifested on a daily basis. Those advances perceived on a day to day, in turn, imply efforts between the different areas of knowledge, seeking to solve real problems with an impact on our daily lives. In this regard, the efforts made that lead to advances in science and technology undoubtedly require computational tools considered fundamental in the process of generating products or services. The use of specialized software in the associated process allows savings in design times, with a direct impact on production costs. The above, applied in the context of the engineering area, results from the optimization and dynamic analysis of mechanical systems. Focusing attention on the specialized software used in engineering for the construction and analysis of mechanical systems, we find those considered in the design process known as Computer Aided Design (CAD) tools; used in multiple areas of the

industry such as mechanical, automotive, naval, aviation, aerospace, medicine, construction and architecture, among others. Finding interfaces that make it possible to import the CAD into an environment defined for certain analyzes is very useful, with the aim of evaluating the behavior of the product or prototype as it performs the task for which it was created. Such is the case of Simulink included in MATLAB, called Simscape. Simulink is a visual programming environment that works on the Matlab programming environment, used in electronic engineering such as biomedical engineering, automatic control and robotics, among others. Based on the advantages offered by CAD tools and the MATLAB environment independently, it is important to generate information regarding the potential of their integration, in the context of the dynamic evaluation of engineering prototypes. In this sense, this article addresses the design and dynamic analysis of a driverless two-wheeled vehicle through the integration of specialized software, addressing procedures that allow CAD models to be linked with Matlab Simulink. It is considered as a contribution related to the use of computational tools used in design stages for the generation of products or services, with the aim of verifying their viability and feasibility. From the results shown, finally, the potential of the application of specialized software prior to implementation or actual construction is revealed, as a reference for procedures associated with the generation of products and services used in our daily lives.

Key words: Computer-aided design, MATLAB Simulink, SIMSCAPE, Smart manufacturing, Engineering prototypes dynamical analysis.

Resumen

En tiempos actuales, el avance en la ciencia y la tecnología se manifiesta diariamente. Aquellos avances percibidos a diario, a su vez, implican el esfuerzo conjunto entre las diversas áreas del conocimiento, buscando resolver problemas reales con impacto en nuestra vida cotidiana. A este respecto, los esfuerzos realizados que derivan en los avances en la ciencia y la tecnología requieren, indiscutiblemente, de herramientas computacionales consideradas fundamentales en el proceso de la generación de los productos o servicios. El uso de software especializado en el proceso asociado permite el ahorro en tiempos de diseño, con impacto directo en los costos de producción. Lo anterior, aplicado en el contexto del área ingenieril, resulta de la optimización y análisis dinámico de sistemas mecánicos. Centrando la atención en el software especializado utilizado en ingeniería para la construcción y análisis de sistemas mecánicos, encontramos los considerados en el proceso de diseño conocidos como herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD); utilizados en múltiples áreas de la industria como la industria mecánica, automotriz, naval, aérea, aeroespacial, de medicina, de construcción y arquitectura, entre otras. Encontrar interfaces que hagan posible la importación del CAD a un entorno definido para ciertos análisis resulta de mucha utilidad, con el objetivo de evaluar el comportamiento del producto o prototipo conforme realiza la tarea para la cual fue creado. Tal es el caso de incluida en MATLAB Simulink, denominada Simscape. Simulink es un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de programación Matlab, utilizado en la ingeniería electrónica como la biomédica, el control

automático y la robótica, entre otros. A partir de las ventajas que ofrecen las herramientas CAD y el entorno MATLAB de forma independiente, resulta importante generar información referida a la potencialidad de su integración, en el contexto de la evaluación dinámica de prototipos ingenieriles. En este sentido, el presente artículo aborda el diseño y análisis dinámico de un vehículo de dos ruedas sin conductor mediante la integración de software especializado, abordando procedimientos que permiten enlazar modelos CAD con Matlab Simulink. Se considera como aportación lo relacionado con el uso de herramientas computacionales empleadas en etapas de diseño para la generación de productos o servicios, con el objetivo de verificar su viabilidad y factibilidad. A partir de los resultados mostrados, finalmente, se pone de manifiesto la potencialidad de la aplicación del software especializado previa implementación o construcción real, como referencia para procedimientos asociados con la generación de productos y servicios utilizados en nuestra vida cotidiana.

Palabras clave: Diseño asistido por ordenador, MATLAB Simulink, SIMSCAPE, Fabricación inteligente, Análisis dinámico de prototipos de ingeniería.

1. Introducción

En tiempos actuales, el avance en la ciencia y la tecnología se manifiesta diariamente. Continuamente se encuentran avances significativos en nuestra realidad inmediata, a partir de la aplicación de los conocimientos y aportaciones realizadas por la comunidad científica. Aquellos avances percibidos a diario, a su vez, implican el esfuerzo conjunto entre las diversas áreas del conocimiento, buscando resolver problemas reales con impacto en nuestra vida diaria. A este respecto, mencionar que en el contexto de los esfuerzos realizados que derivan en los avances en la ciencia y la tecnología, las herramientas computacionales adquieren un rol importante; consideradas fundamentales en el proceso de la generación de los productos o servicios asociados. Así, actualmente es posible encontrar una vasta cantidad de herramientas computacionales (software) a partir de la cual se hace posible el diseño y análisis de lo requerido. En consecuencia, señalar que el uso de software especializado en la generación de productos y servicios permite el ahorro en tiempos de diseño, con impacto directo en los costos de producción. Particularmente, en el contexto del área ingenieril, es posible encontrar software especializado que permite el análisis y optimización de sistemas mecánicos, con su correspondiente solución dinámica. Con ello, a partir de los resultados obtenidos de la aplicación y uso de dicho software, inicia la etapa relacionada con el análisis de la viabilidad del producto generado. Lo anterior refiere particularmente un tema con relevancia significativa, que busca asegurar el funcionamiento y la calidad de éste. Como resultado, la implicación del software especializado en el proceso de la generación de productos deriva en el ahorro de insumos y recurso económico, con los tiempos asociados a la producción misma. Centrando la atención en el software especializado utilizado en ingeniería para la construcción y análisis de sistemas mecánicos, encontramos los considerados en el proceso de diseño: referidos como herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD). El CAD es utilizado actualmente en múltiples áreas de la industria como la industria mecánica, automotriz, naval, aérea, aeroespacial, de medicina, de construcción y arquitectura, entre otras. Principalmente, se utiliza para crear diseños detallados de componentes y sistemas industriales, permitiendo diseñar

productos y prototipos a partir de simulaciones para pruebas. En este sentido, encontrar interfaces que hagan posible la importación del CAD a un entorno definido para ciertos análisis resulta de mucha utilidad, con el objetivo de evaluar el comportamiento del producto o prototipo conforme realiza la tarea para la cual fue creado. Tal es el caso de incluida en MATLAB Simulink, denominada Simscape Multibody. Simulink es un entorno de programación visual que funciona sobre el entorno de programación Matlab, utilizado ampliamente en ingeniería electrónica. Simscape Multibody, por su parte, proporciona un entorno de simulación multicuerpos para sistemas mecánicos en 3D, tales como robots, suspensiones de vehículos, maquinaria de construcción y trenes de aterrizaje de aeronaves. A partir de las ventajas que ofrecen las herramientas CAD y el entorno MATLAB, de forma independiente, resulta importante generar información referida a la potencialidad de su integración, en el contexto de la evaluación dinámica de prototipos ingenieriles enfocado a diversas áreas del conocimiento. En el área ingenieril, MATLAB y el diseño de modelos CAD se utilizan comúnmente para el análisis físico, estructural, mecánico y/o dinámico de un prototipo. A modo de ejemplo, su aplicación en el enfoque mecánico se ve orientado al diseño estructural óptimo para implementación. En el área de control automático, su aplicación se orienta a la automatización, diagnostico de fallas, control de procesos, etc. En ese contexto, se realiza el análisis de la estabilización y el control de un vehículo de dos ruedas sin conductor (o bien, una bicicleta), siendo uno de los casos de estudio de mayor interés analizado en el contexto de la disciplina del control automático. Hasta el día de hoy se han desarrollado diversas investigaciones que contribuyen al conocimiento de su comportamiento dinámico buscando mejores respuestas para controlarlo o estabilizarlo, haciendo uso de múltiples metodologías de control. En Cerone (2010) [8] se diseñó un controlador por retroalimentación de estados donde las ganancias se calculan por medio una desigualdad matricial lineal (LMI) que varía en función de la velocidad traslacional. En Robles (2014) [9] se presentó la instrumentación de una bicicleta y el diseño de un sistema de control para lograr una velocidad deseada por medio de actuadores, esto a partir de un controlador proporcional-integral (PI). En Brizuela (2016) [10] se instrumentó una bicicleta real con el objetivo de ejecutar, analizar y validar algoritmos de control en un entorno completamente físico. Este prototipo se basa en el modelo matemático utilizado en los trabajos antes mencionados. En Brizuela-Mendoza (2016) [11] se diseñó un controlador para estabilizar al vehículo manteniéndolo en posición vertical. Este esquema de control se enmarca en el contexto de un Control Tolerante a Fallas (CTF) con el objetivo de controlar al vehículo aún en presencia de fallas. El trabajo presentado por Ríos Ruíz (2016) [12] tiene como objetivo estabilizar una bicicleta implementando esquemas de control basados en modelos Quasi-LPV. Cada controlador diseñado en este trabajo se basa en modelos en forma Takagi-Sugeno, los cuales fueron validados por medio de simulaciones. En Brizuela Mendoza (2017) [13] se desarrolló un controlador para estabilizar una bicicleta sin conductor a partir de la programación de ganancias de un regulador cuadrático lineal y aplicando un par aplicado al manubrio. El trabajo presentado por Banquero Suárez (2017) [14] presenta el diseño de un Control por Rechazo Activo a perturbaciones (ADRC) considerando perturbaciones externas, las cuales son enviadas a un observador que las estima y realimenta por una ley de control lineal para rechazarlas. El modelo dinámico virtual es simulado mediante una interfaz entre los softwares Adams y MATLAB. En Bravo y Rengifo (2020) [15] se presenta el modelo cinemático de una bicicleta robótica cuyo objetivo es

estabilizarla en posición vertical automáticamente implementando dos estrategias de control: Controlador PID para suavizar los valores de salida ante cambios en la entrada, y un controlador por par calculado, el cual indica el manubrio se debe mover en dirección opuesta al ángulo de balanceo del vehículo. Si bien dichas investigaciones incorporan información relevante del comportamiento dinámico del sistema mencionado, el presente artículo aporta, a través de la integración de software especializado, una forma alterna para su análisis. Es en este sentido en el que se aborda la información contenida a lo largo del presente trabajo, que busca poner de manifiesto el uso e integración de software especializado para el análisis dinámico de prototipos; a partir del correspondiente diseño mecánico en CAD. Se presenta, como resultado, el diseño del prototipo de una bicicleta sin conductor como caso de estudio, con el objetivo de hacer manifiesta la potencialidad de la integración del software SOLIDWORKS con SIMULINK de MATLAB. Se adopta el caso de estudio para la explicación general de la integración del software, con posibilidad de replicarse para el desarrollo de otros prototipos ingenieriles. La información contenida en el presente documento se divide de la siguiente forma: la sección 2 presenta los softwares utilizados para el desarrollo del caso de estudio, la descripción, diseño y configuración del mismo, la sección 3 presenta los resultados obtenidos comprobando la potencialidad y efectividad del uso de un software especializado enfocado al caso de estudio y, finalmente en la sección 3 se presenta la conclusión de los resultados en este trabajo.

2. Materiales y Métodos

Se presentan las generalidades del software especializado considerado, con la finalidad de aproximar el comportamiento dinámico del caso de estudio a través de simulaciones. Se presenta información general asociada al vehículo de dos ruedas, además de los procedimientos realizados a partir de la integración del software con el objetivo de analizar, dinámicamente, el sistema real.

2.1. SolidWorks

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. Ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto, con la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño [1]. Permite reducir considerablemente el tiempo del diseño, generando con ello un ahorro de tiempo y costos e incrementando la calidad de los productos generados. SolidWorks, con la versatilidad de las herramientas que contiene, se utiliza en una gran cantidad de sectores e industrias. Como ejemplo, en el sector aeronáutico se utiliza para diseñar y crear elementos de gran tamaño y precisión, como parte de la estructura mecánica de las aeronaves. La tecnología es otro sector en el que se utiliza SolidWorks, ya que permite poner en contacto la mecánica y la electrónica con otros requisitos de los proyectos. Además, es posible crear productos inteligentes gracias a las herramientas incorporadas que se sincronizan.

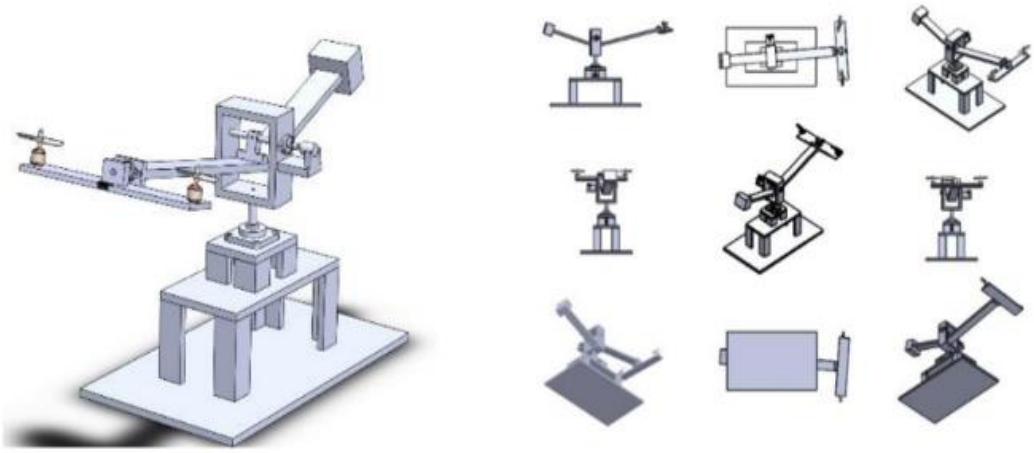


Figura 1. Helicóptero de tres grados de libertad diseñado en SolidWorks [2].

2.2. MATLAB, Simulink y Simscape Multibody

MATLAB es un lenguaje de programación de alto nivel utilizado para el cálculo numérico, el análisis de datos y la visualización. El nombre MATLAB significa «Laboratorio de Matrices», lo que refleja que el lenguaje se centra en las operaciones matriciales y vectoriales. Su punto fuerte es la capacidad de realizar cálculos matemáticos complejos con rapidez y eficacia. Además, tiene una interfaz fácil de usar y una gran biblioteca de funciones y cajas de herramientas. Funciona interpretando scripts y funciones escritas en su propio lenguaje, basado en una combinación de sintaxis C y Fortran. Los scripts de MATLAB se ejecutan línea a línea y la salida se muestra en la ventana de comandos.

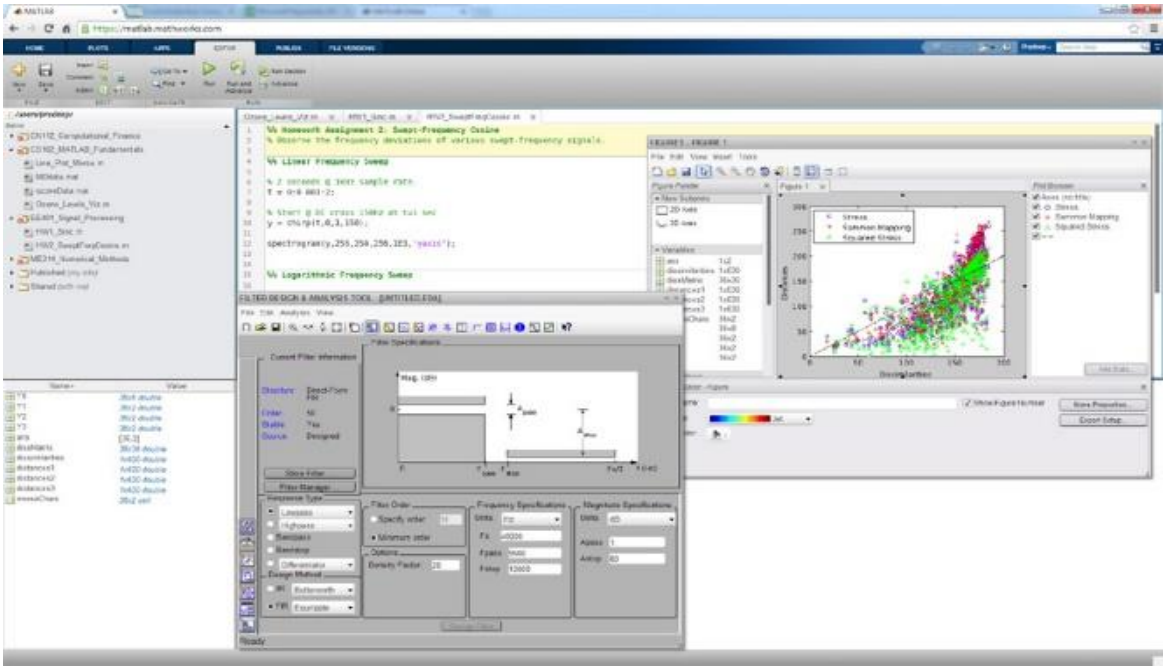


Figura 2. Vista general de interfaz de Matlab [3].

Entre las diversas herramientas contenidas dentro del ambiente del software Matlab, por su parte, se encuentra la denominada Simulink. Simulink es un entorno de diagramas de bloque que se utiliza para diseñar sistemas con modelos multidominio, permitiendo con ello la posibilidad de simular antes de implementar en hardware para validar la factibilidad de lo requerido. Permite utilizar un modelo virtual para simular sistemas dinámicos, validando con ello modelos físicos, pruebas de hardware in-the-loop y prototipado rápido.

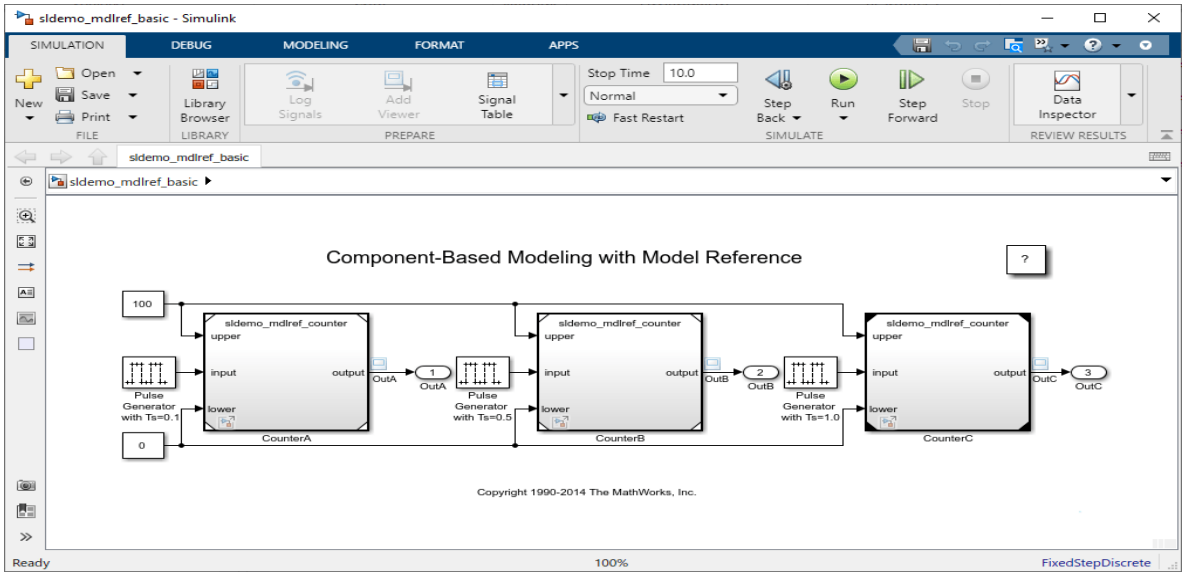


Figura 3. Vista general de interfaz de Simulink de Matlab [4].

Finalmente, entre los elementos de software considerados dentro del presente artículo, se presenta el denominado Simscape Multibody. Simscape Multibody proporciona un entorno de simulación multicuerpo para sistemas mecánicos en 3D, tales como robots, suspensiones de vehículos, maquinaria de construcción y trenes de aterrizaje de aeronaves [5]. Puede modelar sistemas multicuerpo utilizando bloques que representan cuerpos, articulaciones, restricciones, elementos de fuerza y sensores. Simscape Multibody formula y resuelve las ecuaciones de movimiento de todo el sistema mecánico. Permite la importación de montajes CAD completos, incluidas todas las masas, inercias, articulaciones, restricciones y geometría en 3D. Una animación en 3D generada automáticamente hace posible la visualización de la dinámica del sistema. Permite parametrizar modelos utilizando variables y expresiones matemáticas de MATLAB, así como diseñar sistemas de control para sistemas multicuerpo en Simulink. Simscape Multibody, como herramienta de diseño en términos generales, ayuda a desarrollar sistemas de control y verificar su rendimiento en el sistema dinámico mecánico diseñado [6].

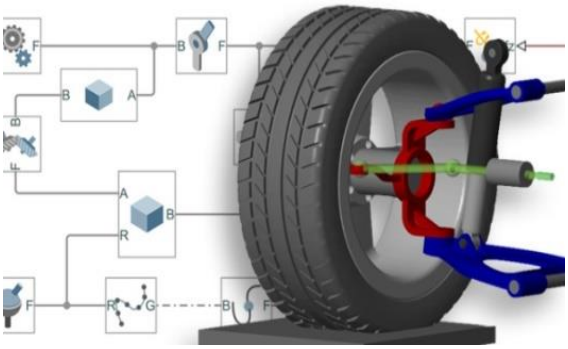


Figura 4. Ejemplo de aplicación del Simscape Multibody [7].

Simscape Multibody Link finalmente, como elemento esencial para lo presentado a lo largo de este artículo, es un complemento que se puede instalar en aplicaciones CAD para exportar modelos de ensamblaje a Simscape Multibody. Dicho complemento exporta un modelo de ensamblaje CAD generado en SolidWorks como un archivo XML, incluyendo los correspondientes archivos de geometría mecánica. Los archivos generados, finalmente, pueden ser importados al ambiente Matlab para el análisis de las variables dinámicas que definen el comportamiento con respecto al tiempo del sistema general.

2.3. Descripción general del caso de estudio: vehículo de dos ruedas sin conductor

Abordando el caso de estudio en términos de su estructura y de acuerdo con [16], son cuatro los subsistemas que en conjunto integran la geometría del vehículo de dos ruedas: un marco general, un marco frontal, una rueda delantera y una rueda trasera**.**

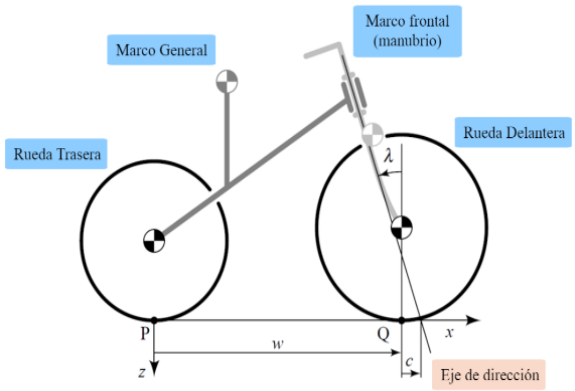


Figura 5. Caso de estudio y subsistemas que definen su geometría física [16].

Con el objetivo de describir las consideraciones mecánicas del vehículo de dos ruedas, señalar que el marco general refiere la estructura fija que en sus extremos permite el acoplamiento con la rueda trasera y la articulación asociada al marco frontal o manubrio, considerando un cuerpo rígido como conductor. El marco frontal, por su parte, es la estructura utilizada por el conductor para dar dirección al movimiento de avance del vehículo, unido en su extremo con la rueda delantera. Cada una de las ruedas, finalmente, representan elementos que permiten el movimiento traslacional de la bicicleta. El comportamiento dinámico del vehículo de dos ruedas, finalmente, se define por diversas características, por ejemplo: la posición de los centros de masa de cada subsistema, la posición angular de la dirección o del marco frontal, la posición angular de la inclinación o ángulo de balanceo, gravedad y velocidad traslacional, entre muchos otros. A partir de la Fig. 5, se observa el esquema del vehículo de dos ruedas donde además de los subsistemas, se presenta la posición y dirección del sistema de coordenadas que requiere el modelo y los tres grados de libertad que considera el modelo matemático (el ángulo de balanceo ϕ, el ángulo del manubrio δ y la velocidad traslacional v). Dicho modelo matemático, como referencia para la dinámica del sistema, surge a partir de ecuaciones diferenciales relacionadas directamente con leyes físicas de movimiento. El resultado, finalmente, refiere dos ecuaciones diferenciales de segundo orden; considerando como grados de libertad la posición angular del marco general con respecto a la horizontal y la posición angular del manubrio con respecto al marco general. La dinámica incluye como fuerzas de entradas generalizadas un par aplicado al marco frontal y un par aplicado al marco general, incluyendo la velocidad traslacional como parte de la dinámica del sistema. En forma generalizada, el sistema se aproxima matemáticamente mediante la expresión:

$$M\ddot{q} + vC_1\dot{q} + [gK_0 + v^2K_2]q = f \qquad \textbf{(Ec. 1)}$$

Donde $q = [\phi \quad \delta]^T$ corresponde al vector de posiciones angulares siendo ϕ el ángulo de balanceo y δ el ángulo del manubrio (ángulo

entre el manubrio y la perpendicular). El vector de fuerzas de entradas generalizadas $f = [T_\phi \quad T_\delta]^T$ incluye como T_ϕ al par aplicado al ángulo de balanceo y T_δ el aplicado al manubrio. Los parámetros M y C_1 representan matrices que contienen masas y amortiguamientos, K_0 y K_2 matrices de rigidez, g es la constante gravitacional y v la velocidad traslacional del vehículo.

2.4. Diseño de caso de estudio en SolidWorks

El previo diseño de un modelo CAD mejora el proceso análisis dinámico y estructural, permitiendo vistas preliminares del prototipo a trabajar; además de la obtención de información relevante como propiedades físicas particulares.

Permite, además, la simulación con interfaces a otros softwares especializados para análisis de comportamiento o estructura en distintos escenarios, etc. Para el desarrollo del modelo CAD del vehículo de dos ruedas considerado, se realizaron las etapas descritas a continuación:

- *Etapa 1: Toma de datos importantes del vehículo de dos ruedas.*

En esta etapa se realizó la recolección de datos particulares del vehículo, como lo son dimensiones longitudinales y angulares, masas, etc. Inicialmente, fue necesario desmontar al vehículo de dos ruedas para únicamente considerar los cuatro subsistemas descritos anteriormente (ver Fig. 6).



Figura 6. Subsistemas del vehículo de dos ruedas.

- *Etapa 2: Diseño del modelo CAD.*

El desarrollo del modelo CAD consideró diseñar los cuatro subsistemas por separado.

A. Marco general

Este subsistema es la estructura central del vehículo, del cual se acoplan el resto de los subsistemas que la constituyen. Su diseño se basa en las dimensiones longitudinales, ubicación, y posición angular de cada eslabón que conforma la estructura completa. Como se observa en la Fig. 7, inicialmente se realizó un bosquejo del esqueleto de la estructura del marco general utilizando líneas, croquis sencillos y croquis en 3D.

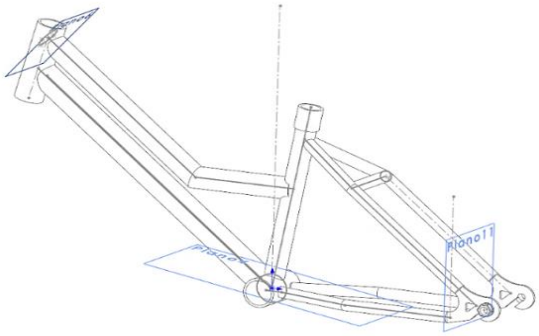


Figura 7. Estructura interna del marco general.

Con la estructura definida por medio de medidas longitudinales y los ángulos entre cada eslabón tomado del vehículo real, se utilizaron planos en diferentes extremos de la estructura para que, con la herramienta de Saliente/Base barrido, crear eslabones sólidos de dimensiones reales. Teniendo la estructura sólida, consecuencia de la operación anterior, se utilizó la herramienta de Vaciado. Esta operación vacía una pieza dejando abiertas las caras seleccionadas. Se aplicó en toda la estructura generada, dejando abierto el eslabón en donde se ubica el marco frontal (ver Fig. 8).

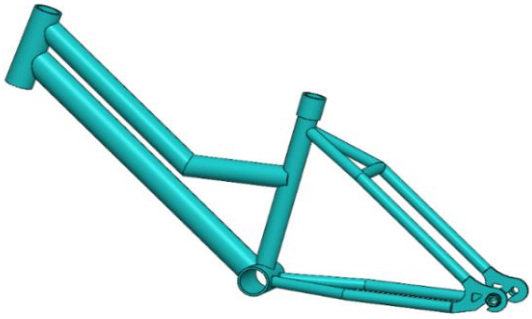


Figura 8. Marco general del vehículo de dos ruedas.

Finalmente, se realizó la parametrización del diseño terminado. En otras palabras, se seleccionó el tipo de material (tomando en cuenta el material de la estructura real) y se configuró para que la masa de este elemento fuera aproximadamente igual a la masa de la estructura real.

B. Marco frontal

El marco frontal es el subsistema encargado de dar dirección al vehículo de dos ruedas. En este caso, el subsistema tiene dos objetivos importantes: manipular la dirección del vehículo y sujetar la rueda delantera. Como se observa en la Fig. 9, fue bosquejado un esqueleto del marco frontal, a partir de la mitad de todo el subsistema, es decir, la vista de perfil.

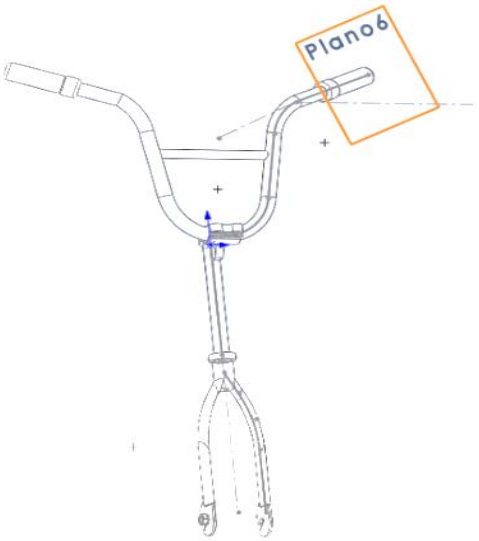


Figura 9. Estructura interna del marco frontal.

Una vez definido el esqueleto con las dimensiones longitudinales y angulares, se insertaron planos para dibujar círculos en los extremos de las líneas con un diámetro equivalente al de cada eslabón real y, con la herramienta de Saliente/Base barrido, crear la estructura sólida (ver Fig. 10). Posterior a eso, se utilizó una última herramienta con el nombre de Simetría. Esta herramienta crea una copia de operaciones o sólidos respecto a una cara o plano, utilizada para completar el marco frontal a partir de la estructura realizada previamente.



Figura 10. Marco frontal del vehículo de dos ruedas.

Una vez terminado, el diseño fue parametrizado seleccionando el material y configurándolo para que su masa fuera aproximadamente igual al subsistema real.

C. Rueda Delantera

Este subsistema es un elemento que permite el movimiento traslacional de la bicicleta y, al mismo tiempo, asociado con el marco frontal, manipular la dirección al vehículo. Para su diseño, se realizó el dibujo de los contornos de cada uno de los elementos que constituyen este subsistema, por ejemplo: el rin, neumático, rayos de metal (elementos ubicados al centro de la rueda), etc., utilizando planos, croquis sencillos y croquis en 3D (ver Fig. 11).

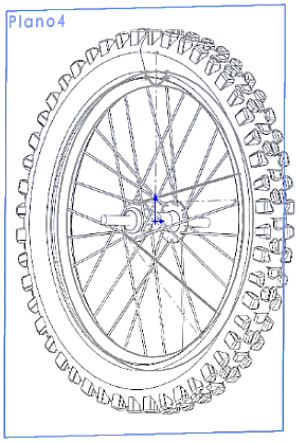


Figura 11. Estructura interna de la rueda delantera.

Y, de acuerdo con el elemento, se utilizaron las operaciones de Saliente/Base barrido y Extruir saliente/base para convertir los contornos dibujados a elementos sólidos. Debido a que existen elementos similares que se encuentran acoplados en un mismo punto, se utilizó la operación de Matriz Circular para crear copias de uno solo, entorno a un punto y con un ángulo especifico entre ellos.



Figura 12. Rueda delantera del vehículo de dos ruedas.

Al igual que los subsistemas descritos anteriormente, el diseño fue realizado contemplando dimensiones reales provenientes del subsistema real. Mediante un procedimiento similar a los descritos previamente, a partir de la selección del material fue posible su parametrización, en una búsqueda por aproximar lo diseñado a un prototipo real.

D. Rueda trasera

El último subsistema considerado para el modelo CAD es la rueda trasera, la cual tiene las mismas características que la rueda delantera.

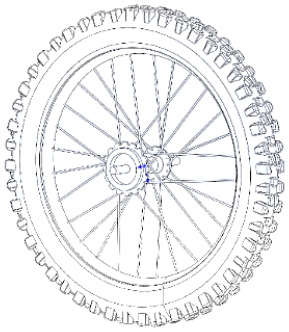


Figura 13. Estructura interna de la rueda delantera.

A partir de la Fig. 13, mencionar que la rueda trasera real considera un elemento adicional con respecto a la delantera: un engrane en su estructura a cargo de acoplar la cadena asociada a los pedales.



Figura 14. Rueda trasera del vehículo de dos ruedas.

Es importante recalcar que cada uno de los subsistemas descritos fue diseñado tomando en cuenta todos los elementos en su estructura.

- *Etapa 3: Ensamble del modelo CAD*

El acoplamiento de los subsistemas (ver Fig. 15) se realizó buscando que existiera un movimiento entre cada uno ellos, simulando dicho movimiento al de un vehículo de dos ruedas real. Se consideraron relaciones de

posición tipo concéntricas para ambas ruedas acopladas al marco general, y relaciones de posición tipo coincidente y concéntrica para acoplar el marco frontal con la rueda delantera.



Figura 15. Vehículo de dos ruedas diseñado en SolidWorks.

2.5. Importación de modelo CAD del caso de estudio a MATLAB-Simulink

El principal objetivo de comunicar el modelo CAD diseñado y parametrizado en SolidWorks a MATLAB-Simulink a través de la herramienta Simscape Multibody es configurar y manipular las articulaciones que este considera, a cargo de la definición de su comportamiento dinámico. Al mismo tiempo, finalmente, se pretende hacer manifiesto el potencial de la herramienta aplicada a posibles futuras investigaciones en torno a este vehículo. Con la finalidad de que el modelo CAD tuviera un comportamiento igual al de una bicicleta real, resultó necesario configurar las articulaciones que permiten un movimiento en cada subsistema del vehículo.

- *Articulación a la Rueda delantera y trasera.*

La articulación considerada a cada una de las ruedas es de tipo *Revolute*. Dado que el movimiento que deben realizar ambos subsistemas es giratorio entorno a un punto, el objetivo de esta articulación es simular un movimiento de avance configurado a través de un par aplicado a esta articulación (ver Fig. 16). El par asociado a esta articulación puede ser aplicado al vehículo real por medio de un motor.

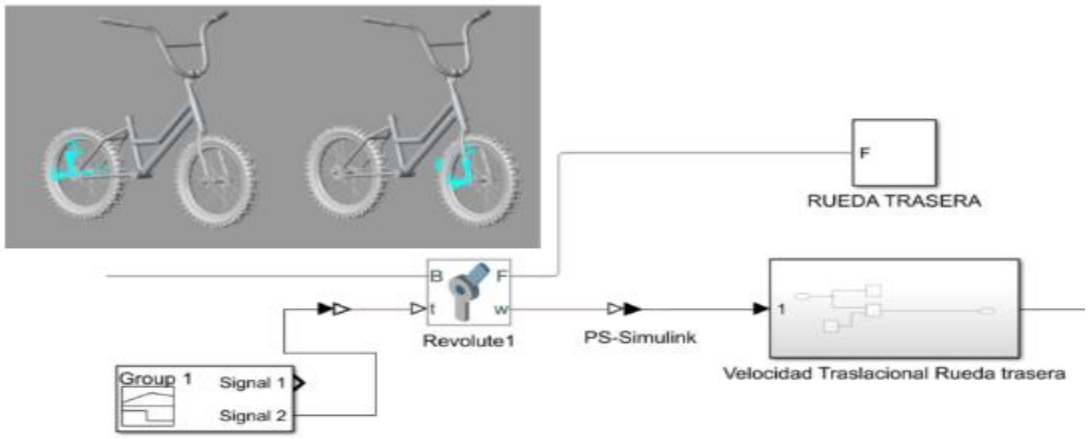


Figura 16. Articulación tipo Revolute para la rueda delantera y trasera.

- *Articulación al marco frontal.*

Dado que el marco frontal gira entorno a un eje el cual da dirección al vehículo, se consideró la misma articulación de tipo *Revolute* para este subsistema, el cual se presenta en la Fig. 17. Es importante mencionar que esta articulación afecta el movimiento de dos subsistemas: el marco frontal y la rueda delantera, ambos

encargados de dar dirección y movimiento al vehículo. La simulación de esta articulación puede ser replicada considerando un actuador en este subsistema.

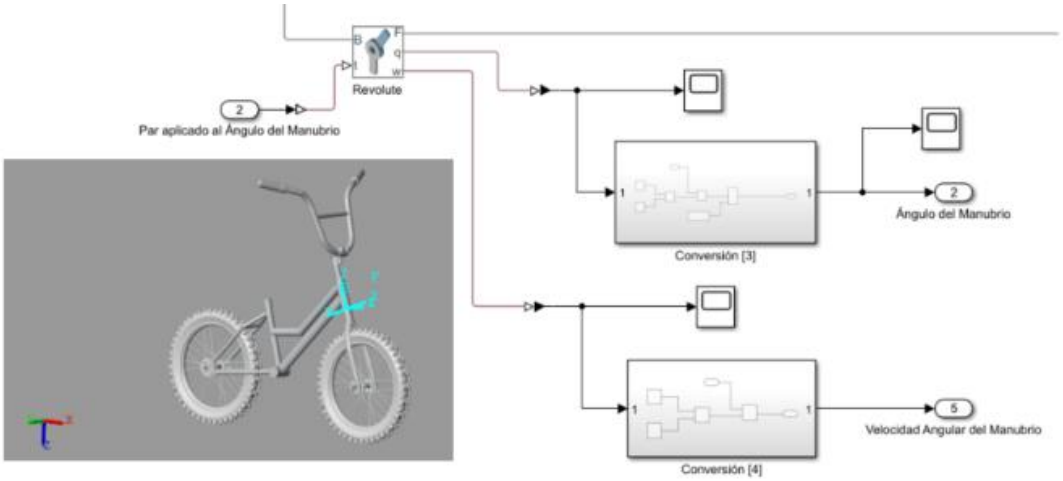


Figura 17. Articulación tipo Revolute para el marco frontal.

- *Articulación al marco general.*

Esta articulación tiene efecto directo sobre la estructura central, lo cual afecta directamente el comportamiento del resto de los subsistemas. La articulación tipo *Gimbal* permite un movimiento completo sobre los ejes X, Y y Z (ver Fig. 18). En este caso, se configuró para que su movimiento fuera limitado, considerando únicamente el eje X. A través del mismo, se hacen posibles cambios de posición angular sobre el eje vertical del vehículo. Dicha posición angular puede ser registrada por medio de un sensor acoplado directamente cn el marco general del vehículo de dos ruedas real.

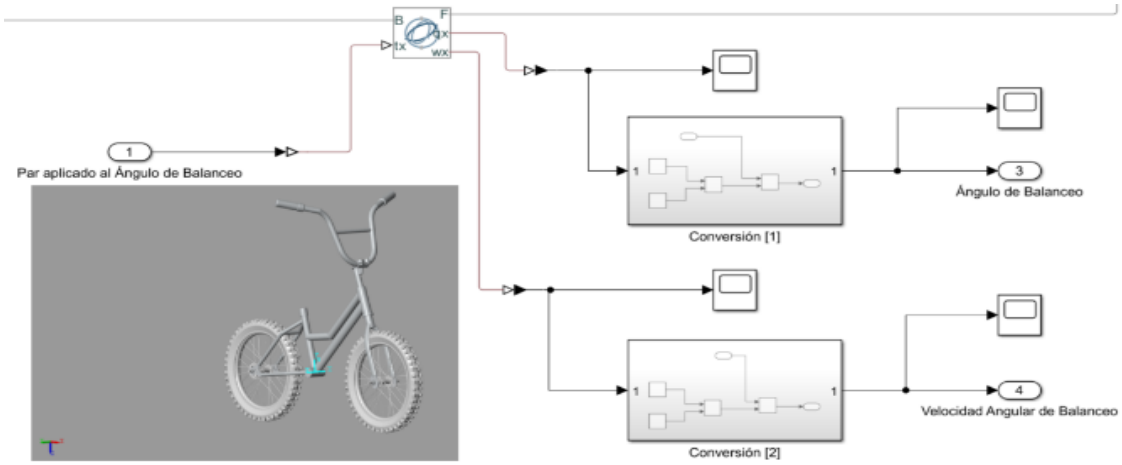


Figura 18. Articulación Gimbal para el marco general.

3. Resultados

De acuerdo con la Sección 2.3, la dinámica del vehículo se aproxima matemáticamente con la Ec. (1), teniendo como fuerzas de entradas generalizadas un par aplicado al marco general T_ϕ y un par aplicado al marco frontal T_δ. Con la finalidad de observar, analizar y validar el comportamiento dinámico del modelo CAD del vehículo importado a MATLAB-Simulink a través de

Simscape y contemplando las configuraciones descritas anteriormente, se llevaron a cabo diferentes pruebas considerando los pares como fuerzas de entrada generalizada y velocidad traslacional constante y variable según sea el caso, teniendo como resultados lo presentado a continuación.

- *Prueba 1*

En primer lugar, se consideró verificar que el vehículo fuera inestable al no ser sometido a ningún tipo de fuerza de entrada generalizada (es decir $T_\phi = 0$ y $T_\delta = 0$), y considerando una velocidad traslacional con un valor de $v = 1.271\, m/s$. La posición inicial del vehículo fue considera en su posición vertical con ciertas condiciones "reales" (ángulo balanceo con valor de 10° respecto a la vertical y 10° en el ángulo del manubrio respecto al marco frontal).

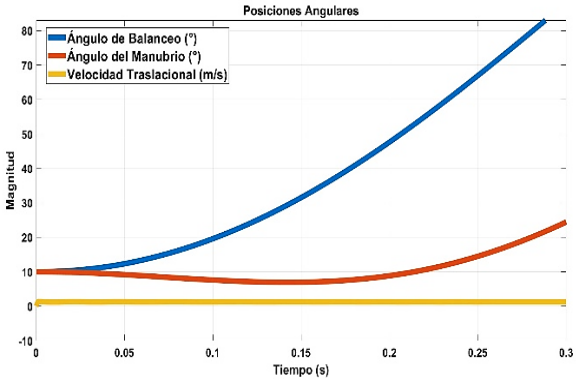


Figura 19. Resultados prueba 1.

Debido a la dinámica inestable propia del vehículo y al no tener fuerzas de entrada generalizada que afecten su comportamiento, el vehículo comienza a caer aumentando su valor en grados respecto a la vertical, observando que el manubrio se ve afectado por el cambio de posición del marco general y de la rueda delantera.

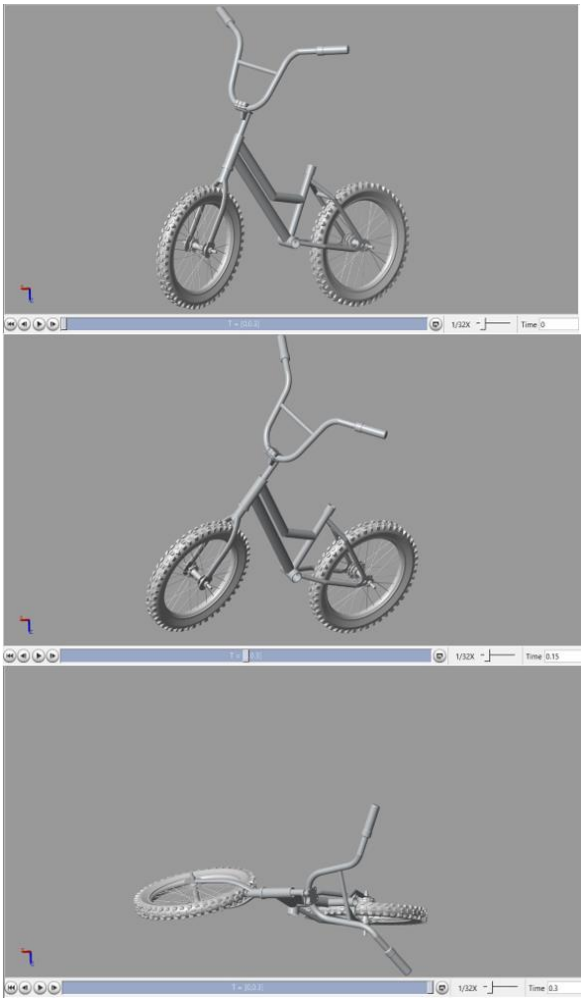


Figura 20. Animación de resultados prueba 1.

La Fig. 20. muestra capturas de pantalla en distintos tiempos de simulación de la prueba abordada. Se observan las trayectorias de las posiciones angulares de balanceo y manubrio en tres tiempos distintos: inicio (en 0 segundos), mitad de prueba (0.15 s) y tres segundos después, al finalizar la prueba.

A partir de esto, se concluye que la dinámica del vehículo en movimiento y sin ningún tipo de fuerza, perturbación o condiciones externas (fricción en las ruedas, suelo, etc), corresponde a lo percibido en la realidad. Se corrobora entonces que las configuraciones consideradas en software derivan en lo esperado con respecto a comportamientos reales.

- *Prueba 2*

Con el objetivo de observar una dinámica semejante, para esta prueba se consideró una velocidad traslacional variable con un rango de variación de *4.5* a *1.3 m/s*, con las mismas posiciones iniciales consideradas y configuradas en la prueba antrerior.

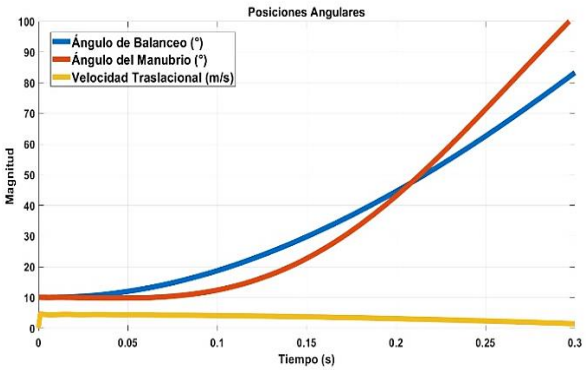


Figura 21. Resultados prueba 2.

Como se puede apreciar la Fig. 21, a medida que la velocidad decrece, el ángulo de balanceo cambia rápidamente de posición llevando al vehículo a un valor de 103° aproximadamente. Nótese que el vehículo evoluciona mas allá de los 90 grados considerados entre la superficie de movimiento y la vertical del vehículo, esto debido a que el CAD no considera el "suelo" (sin afectaciones en las condiciones dinámicas del sistema referido). De igual forma, el ángulo del manubrio sufre un cambio a consecuencia del movimiento repentino en el ángulo de balanceo. El efecto de la velocidad traslacional variable con respecto a la prueba anterior, finalmente, se percibe a partir de la dinámica en el manubrio. Nótese que mientras que la prueba anterior lleva el manubrio a 20 grados en 0.3 s, la velocidad variable decreciente lleva este subsistema del vehículo hasta los casi 90 grados, en el mismo tiempo de prueba.

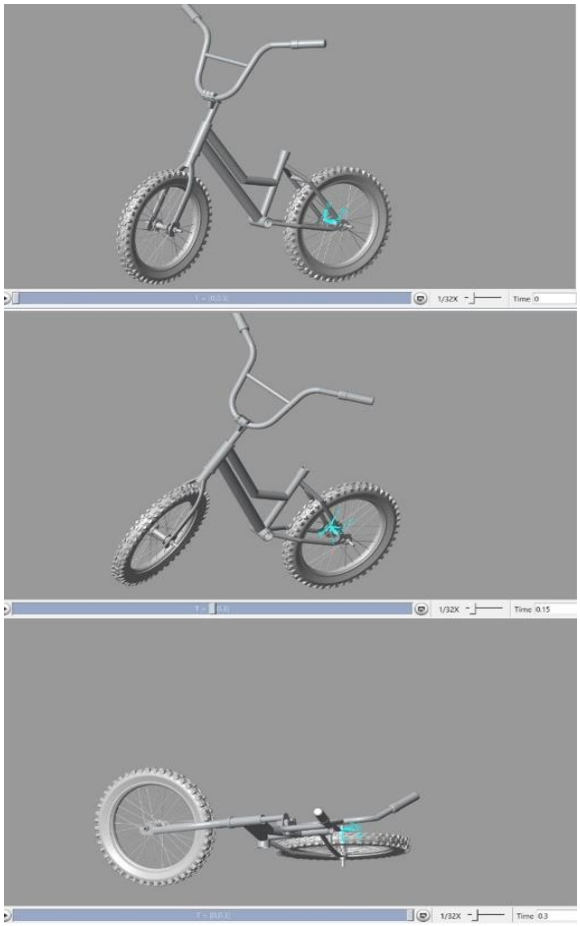


Figura 22. Animación de resultados prueba 2.

La Fig. 22. muestra capturas de pantalla en distintos tiempos de simulación de la prueba abordada. Se observan las trayectorias de las posiciones angulares de balanceo y manubrio en tres tiempos distintos: inicio (en 0 segundos), mitad de prueba (0.15 s) y tres segundos después, al finalizar la prueba.

- *Prueba 3*

A diferencia que las pruebas descritas anteriormente, en la abordada se aplican pares de fuerza de entrada generalizada de acuerdo con la Ec. (1). Teniendo en cuenta que cada uno de ellos afecta directamente a ambas posiciones angulares, el objetivo de esta simulación es observar una dinámica entre ambas posiciones a consecuencia de los movimientos cada subsistema y de la velocidad traslacional constante aplicada ($v = 1.271\ m/s$).

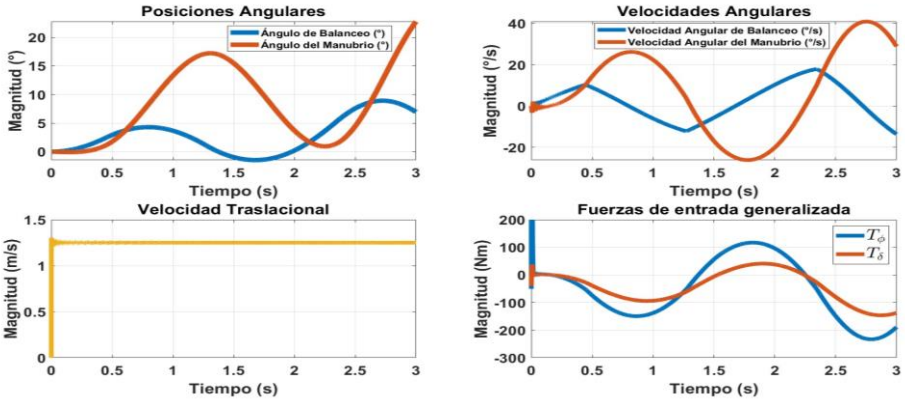


Figura 23. Resultados prueba 3.

A partir de la Fig. 23, en $t = 0.7s$, el ángulo de balanceo cambia de posición de 0° a 5° a causa del par aplicado con un valor de $T_\phi = 150\ Nm$, aproximadamente. Este movimiento provoca que el ángulo del manubrio cambie su posición hasta 18° aproximadamente. Y, a consecuencia del segundo cambio de posición del ángulo de balanceo (de 5° a 0°, aproximadamente) y del par aplicado a él, el ángulo del manubrio también cambia su dirección de movimiento.

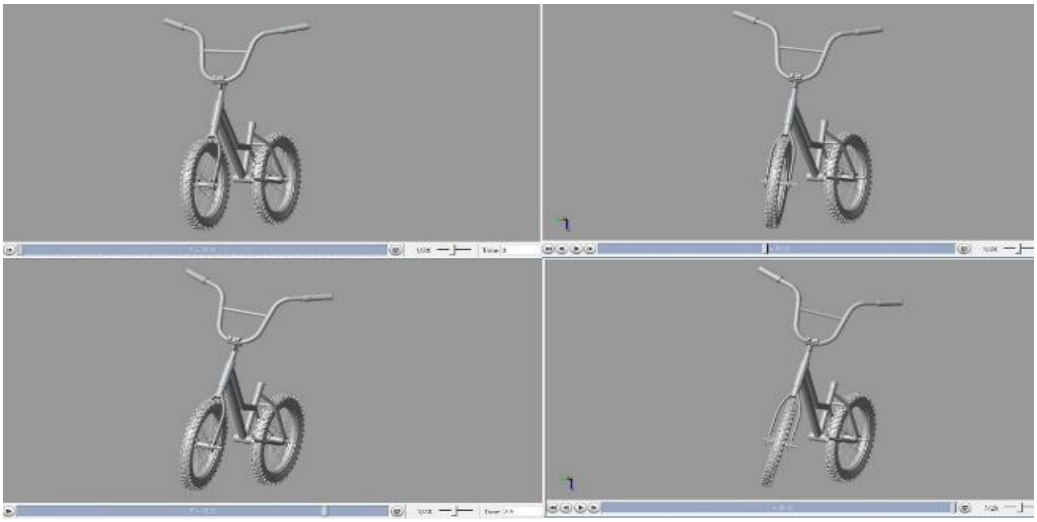


Figura 24. Animación de resultados prueba 2.

La Fig. 24. muestra capturas de pantalla en distintos tiempos de simulación de la prueba abordada. Se observan las trayectorias de las posiciones angulares de balanceo y manubrio en tiempos distintos: inicio (en 0 segundos), mitad de prueba (1.4 y 2.5 s) y tres segundos después, al finalizar la prueba. Cabe el comentario de que en la prueba los pares de fuerza aplicados consideran cambios de signo, los cuales afectan la respuesta dinámica de las posiciones angulares de balanceo y del manubrio. Con ello, se observan valores positivos y negativos en su respuesta con respecto a la posición vertical del vehículo y al marco general, respectivamente. Señalar, finalmente, el comportamiento de las velocidad angulares para cada grado de libertad considerado en la dinámica del vehículo, a consecuencia de los pares de fuerza mecánica aplicados.

- *Prueba 4*

Considerando nuevamente ambos pares de fuerza, se adopta por aplicar una velocidad traslacional variable con un rango de cambio de 3.1 a 2.5 m/s. El objetivo de esta prueba es observar un comportamiento dinámico similar al analizado anteriormente, ante una velocidad traslacional decreciente.

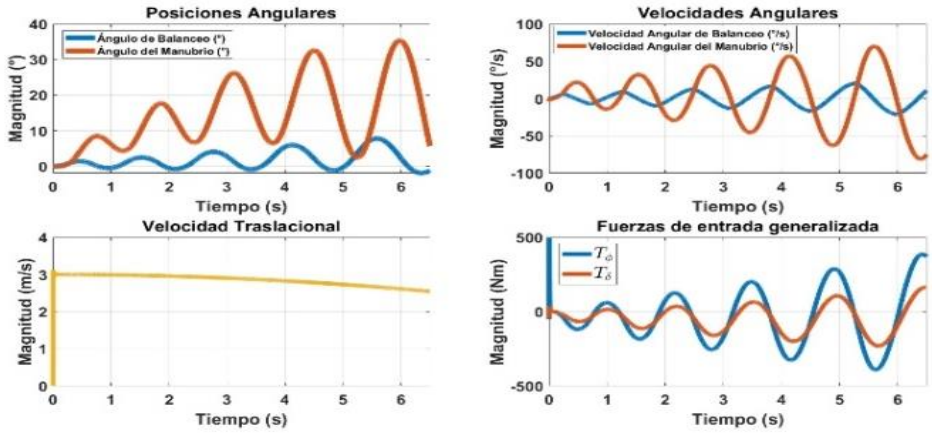


Figura 25. Resultados prueba 4.

Como se aprecia en la Fig. 25, las fuerzas de entrada generalizada fueron aplicadas considerando funciones senoidales cuya amplitud crece con respecto al tiempo. Debido al comportamiendo de los pares aplicados en cada segundo de tiempo y la velocidad traslacional variable, el vehículo no cae inmediatamente, a diferencia de lo presentado en pruebas anteriores. En este caso, ambas posiciones angulares se mantienen oscilando, producto de la aplicación de ambos pares mecánicos.

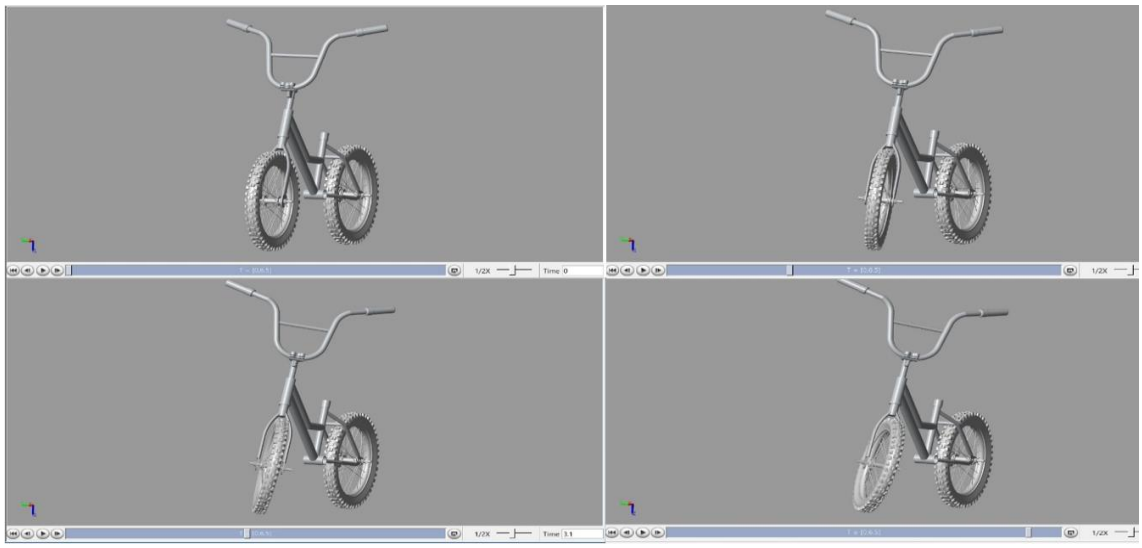


Figura 26. Animación de resultados prueba 2.

La Fig. 26. muestra capturas de pantalla en distintos tiempos de simulación de la prueba abordada. Se observan las trayectorias de las posiciones angulares de balanceo y manubrio en tiempos distintos: inicio (en 0 segundos), mitad de prueba (2 y 3.1 s) y seis segundos

después, al finalizar la prueba. A partir de esta prueba, es posible concluir que la dinámica del vehículo de dos ruedas puede ser manipulada mediante la aplicación de fuerzas de entrada generalizada, con potencial interés dentro del contexto de la disciplina del control automático.

4. Conclusiones

En el presente artículo se aborda el diseño y parametrización de un modelo CAD en el software de SolidWorks a partir de un vehículo de dos ruedas real. Al mismo tiempo, se presenta el análisis dinámico del modelo CAD desarrollado por medio de una interacción con el software de MATLAB-Simulink a través de la herramienta Simscape. La interacción entre ambos softwares especializados brindan la oportunidad de conocer el comportamiento dinámico del prototipo basado en información aproximadamente real (en este caso dirigido a estructura y movimiento).

A partir de los resultados presentados, se valida el comportamiento dinámico del vehículo en CAD respecto a los movimientos de una bicicleta real. Cada una de las pruebas considera un comportamiento distinto de velocidad traslacional, con ello, se observa como el ángulo del balanceo y manubrio tienden a tener una respuesta inestable. Con esto, se validan las configuraciones realizada al vehículo en Simscape, asegurando un comportamiento inestable, como suele ser en la realidad. Finalmente, se concluyen que, la aplicación de softwares especializados son una potencial herramienta preliminar a la construcción o implementación física. Y, particularmente en este caso, una potencial herramienta de análisis previo a investigaciones enfocadas al vehículo de dos ruedas, especialmente del área de control automático. Su amplia gama de configuraciones y herramientas permite al usuario diseñar diferentes tipos de controladores considerando teorías analizadas en esta línea de investigación, además de realizar pruebas considerando distintos escenarios simulando la realidad.

Los resultados reportados en este trabajo presentan herramientas y configuraciones importantes para el diseño de sistemas de control orientados al comportamiento dinámico del vehículo de dos ruedas, ya que cada articulación configurada en conjunto con la información que el software proporciona (como lo es, la velocidad traslacional, posiciones angulares, etc.) proporcionan una amplia gama de posibilidades para experimentar bajo distintos escenarios y evaluar si el sistema de control diseñado es ideal para el vehículo de dos ruedas.

5. Agradecimientos

Se agradece al El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). Al Centro Univsersitario del Sur de la Universidad de Guadalajara por todo el apoyo recibido.

6. Referencias

[1] CAD en 3D de SOLIDWORKS. (2020). SOLIDWORKS. Recuperado de https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-3d-cad.

[2] Brizuela-Mendoza, J. A., Rosales-Díaz, A., Rumbo-Morales, J. Y., Sorcia-Vázquez, F. D. J., & Martínez-García, M. (2019). Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica.

[3] MathWorks – Creadores de MATLAB Simulink – MATLAB y Simuulink (s. f). MATLAB & Simulink. Recuperado de https://la.mathworks.com/.

[4] Simulación y diseño basado en modelos con Simulink. (s.f.). Recuperado de

https://la.mathworks.com/products/simulink.html

[5] Das, S. (2020). Modelado y simulación de sistemas mecatrónicos mediante Simscape . Editores Morgan y Claypool.

[6] Pozzi, M., Achilli, GM, Valigi, MC y Malvezzi, M. (2022). Modelado y simulación de agarre robótico en simulink mediante simscape multibody. Fronteras en robótica e inteligencia artificial, 9, 873558.

[7] SimScape Multibody. (s. f.). Recuperado de https://la.mathworks.com/products/simscape-multibody.html

[8] Cerone, V., Andreo, D., Larsson, M., and Regruto, D. (2010). Stabilization of a riderless bicycle [applications of control]. IEEE Control Systems Magazine, 30(5), 23–32.

[9] Robles, J., Zaragoza, C.A., Martínez, V.A., Mendoza, J.B., and Gómez-Becerra, F. (2014). Instrumentación y control de velocidad de un vehículo de dos ruedas. XI Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico.

[10] Brizuela, J., Astorga, C., Zavala, A., and Canales, F. (2016). Instrumentation of a bicycle without driver for experimental testing of automatic control. IEEE Latin America Transactions, 14(8), 3540–3546.

[11] Brizuela Mendoza, J.A., Zaragoza, A., Zavala Río, A., and Canales Abarca, F. (2016). Control tolerante a fallas activo: Estimación y acomodación de fallas en sensores aplicado al modelo LPV de una bicicleta sin conductor. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 13(2), 174–185.

[12] Ríos Ruiz, C. (2016). Estabilización y control de velocidad de una bicicleta mediante el enfoque Takagi-Sugeno. Tecnológico Nacional de México.

[13] Brizuela-Mendoza, J.A., Astorga-Zaragoza, C.M., Zavala- Río, A., Canales-Abarca, F., and Martínez-García, M. (2017). Gain-scheduled linear quadratic regulator applied to the stabilization of a riderless bicycle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 231(8), 669–682.

[14] Baquero Suárez, M., Cortes-Romero, J., Arcos-Legarda, J., and Coral-Enríquez, H. (2017). Estabilización automática de una bicicleta sin conductor mediante el enfoque de control por rechazo activo de perturbaciones. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 15(1), 86–100.

[15] Bravo, D. and Rengifo, C. (2020). Estudio de la dinámica y control de una bicicleta robótica. Revista Mexicana de Física. E, Publicación de Enseñanza, Historia y Filosofía de la Sociedad Mexicana de Física, 17, 62. doi:10.31349/RevMexFisE.17.62.

[16] Meijaard, J.P., Papadopoulos, J.M., Ruina, A., and Schwab, A.L. (2007). Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review. Proceedings of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences, 463(2084), 1955– 1982.