

**Universidad Internacional de La Rioja**

**Máster universitario en Ingeniería Matemática y  
Computación**

Modelado y simulación del  
control de seguimiento de un  
robot UAV

**Trabajo Fin de Máster**

**Tipo de trabajo:** Aplicación Práctica Real

**Presentado por:** Gustavo Vinicio Monge García

**Director:** Prieto Rico, Ignacio

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo modelar y simular el control de seguimiento de camino de una Unidad Autónoma Voladora (UAV) para los caminos Hélice, Senoidal y Líneas con la aplicación de métodos iterativos (Euler) para el diseño del controlador, con la finalidad de ver la respuesta del sistema. Se realizó la simulación del vuelo del dron a través del uso de Matlab, donde se verificó el funcionamiento del sistema simulado mediante la variación de los parámetros ganancia del controlador ( $W$ ) y Ganancia del sistema de evasión de obstáculos, para encontrar los valores que permiten al dron completar el camino con un menor error y oscilaciones. Como resultados de las simulaciones se pudo conocer la respuesta del control de seguimiento de caminos, al variar los parámetros de su configuración, con lo cual se obtuvo los valores de  $W$  en los que se presentan menos errores en la trayectoria programada, los parámetros de  $W$  y de Ganancia para los cuales el robot puede superar los obstáculos sin colisiones y la condiciones que facilitan o dificultan el funcionamiento del controlador.

**Palabras Clave:** UAV, control, Euler, camino.

## Abstract

The aim of this project is to model and simulate the trajectory tracking's control of an Autonomous Flying Unit (UAV) for the Helix, Senoidal and Line trajectories with the application of iterative methods (Euler) for the design of the controller, in order to see the system's response. The simulation of the drone's flight with the use of Matlab, where the operation of the simulated system was verified through the variation of the controller ( $W$ ) and system's evasion gains parameters, to find the values that allow the drone to complete the path with minor error and oscillations. As the results of the simulations, the response of the track control could be known, by varying the parameters of its configuration, which obtained the values of  $W$  which the minor errors occur in the programmed trajectory, the parameters of  $W$  and Gain for which the robot can overcome obstacles without collisions and the conditions that facilitate or hinder the operation of the controller.

**Keywords:** UAV, controller, Euler, trail.

# Índice de contenidos

1.	Introducción .....	1
1.1.	Justificación.....	1
1.2.	Planteamiento del trabajo .....	2
1.3.	Estructura de la memoria.....	2
2.	Contexto y estado del arte.....	4
2.1.	Marco Teórico .....	4
2.1.1	Unidad Autónomo Voladora .....	4
2.1.2	Sistemas de control .....	5
2.1.3	Métodos Numéricos.....	6
2.1.4	Modelado y Simulación .....	7
2.2.	Estado del Arte.....	10
3.	Objetivos concretos y metodología de trabajo.....	14
3.1.	Objetivo general .....	14
3.2.	Objetivos específicos .....	14
3.3.	Metodología del trabajo .....	14
3.3.1	Desarrollo del modelo.....	16
3.3.2	Simulación .....	16
4.	Desarrollo específico de la contribución .....	18
4.1.	Desarrollo del modelo .....	18
4.1.1	Modelado del UAV.....	18
4.1.2	Modelado del control de seguimiento de camino.....	21
4.1.3	Modelado del método de evasión de obstáculos.....	29
4.2.	Simulación.....	30
4.2.1	Implementación en Matlab .....	30
4.2.2	Verificación del sistema .....	40

4.3.	Análisis de Datos .....	44
4.3.1	Control de seguimiento de caminos .....	44
4.3.2	Sistema de evasión de obstáculos .....	57
5.	Conclusiones y trabajo futuro .....	70
5.1.	Conclusiones .....	70
5.2.	Líneas de trabajo futuro .....	72
6.	Bibliografía .....	73
7.	ANEXOS .....	75

## Índice de tablas

<b>Tabla 2.1</b> Modelos matemáticas de dispositivos conocidos .....	8
<b>Tabla 2.2</b> Resumen de artículos revisados de temas relevantes para el desarrollo del trabajo .....	12
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados de la simulación del control de seguimiento de camino: Hélice .....	46
<b>Tabla 4.2.</b> Errores promedios de la simulación del camino Hélice .....	48
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados de la simulación del control de seguimiento de camino: Hélice .....	50
<b>Tabla 4.4.</b> Errores promedios de la simulación del camino Hélice .....	50
<b>Tabla 4.5.</b> Resultados de la simulación del control de seguimiento de camino: Líneas .....	53
<b>Tabla 4.6.</b> Errores promedios de la simulación del camino Líneas .....	53
<b>Tabla 4.7.</b> Ángulos en los que el sistema de control de seguimiento funciona, en función de la ganancia $W$ . .....	56
<b>Tabla 4.8.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$ y $W = -0.9$ .....	60
<b>Tabla 4.9.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 16$ y $W = -0.1$ .....	60
<b>Tabla 4.10.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.2$ y $W = -1$ .....	62
<b>Tabla 4.11.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 1.7$ y $W = -0.1$ .....	63
<b>Tabla 4.12.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$ y $W = -0.9$ .....	65
<b>Tabla 4.13.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 3.4$ y $W = -0.1$ .....	65
<b>Tabla 4.14.</b> Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para $0 \leq \text{Ganancia} \leq 4$ y $W = -1$ .....	69

## Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> Respuesta de la solución analítica versus la aproximada.....	6
<b>Figura 2.2</b> Esquema de etapas que se desarrollan en el proceso de simulación.....	10
<b>Figura 3.1.</b> Resumen de la metodología planteada para el presente trabajo. ....	15
<b>Figura 4.1.</b> Representación del dron en 2D .....	18
<b>Figura 4.2.</b> Representación del dron en 3D .....	20
<b>Figura 4.3.</b> Representación del camino y del vector $Pd'$ en función de los componentes.....	23
<b>Figura 4.4</b> Creación de un nuevo panel en Matlab. ....	37
<b>Figura 4.5</b> Panel nuevo de Matlab.....	37
<b>Figura 4.6</b> Panel las ventanas axes1, axes2 y axes3.....	38
<b>Figura 4.7</b> Panel con los recuadros de textos.....	38
<b>Figura 4.8</b> Panel con los tipos de caminos .....	38
<b>Figura 4.9</b> Panel con los edit text para el ingreso de la velocidad, ganancia y tiempo de simulación. ....	39
<b>Figura 4.10</b> Panel con edit text y listbox para el ingreso de los parámetros para la evasión de obstáculos.....	39
<b>Figura 4.11</b> Panel con los elementos que se van a utilizar para la simulación.....	40
<b>Figura 4.12</b> Panel con todos los elementos necesarios para la simulación.....	40
<b>Figura 4.13</b> Verificación del control de seguimiento del camino Hélice .....	41
<b>Figura 4.14</b> Verificación del control de seguimiento del camino Senoidal. ....	41
<b>Figura 4.15</b> Verificación del seguimiento de camino Líneas .....	42
<b>Figura 4.16</b> Verificación del control de seguimiento de camino Hélice con 3 obstáculos.....	42
<b>Figura 4.17</b> Verificación del control de seguimiento de camino Senoide con 3 obstáculos ..	43
<b>Figura 4.18</b> Verificación del control de seguimiento de camino Líneas con 3 obstáculos.....	43
<b>Figura 4.19</b> Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de -1.1 a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W. ...	45
<b>Figura 4.20.</b> Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de 0.1 a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W. ...	45

<b>Figura 4.21.</b> Gráfica de los errores para $x$ , $y$ , $z$ y $\varphi$ , con $W = -1$ .	46
<b>Figura 4.22.</b> Gráfica de los errores para $x$ , $y$ , $z$ y $\varphi$ , con $W = -0.8$ .	47
<b>Figura 4.23.</b> Simulación del seguimiento de camino del dron, con $W = -0.8$	47
<b>Figura 4.24.</b> Velocidades de $x$ , $y$ , $z$ y $\varphi$ de la simulación, con $W = -0.8$	48
<b>Figura 4.25.</b> Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de $-1.1$ a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes $x$ , $y$ , $z$ e $W$ .	49
<b>Figura 4.26.</b> Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de $0.1$ a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes $x$ , $y$ , $z$ e $W$ .	49
<b>Figura 4.27.</b> Simulación del seguimiento de camino del dron, con $W = -0.6$ .	51
<b>Figura 4.28.</b> Gráfica de los errores para $x$ , $y$ , $z$ y $\varphi$ , con $W = -0.6$ .	51
<b>Figura 4.29.</b> Velocidades de $x$ , $y$ , $z$ y $\varphi$ de la simulación, con $W = -0.6$	51
<b>Figura 4.30.</b> Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de $-1.1$ a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes $x$ , $y$ , $z$ e $W$ .	52
<b>Figura 4.31.</b> Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de $0.1$ a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes $x$ , $y$ , $z$ e $W$ .	52
<b>Figura 4.32.</b> Simulación del seguimiento de camino del dron, con $W = -1$	54
<b>Figura 4.33.</b> Simulación del seguimiento de camino del dron, con $W = -0.6$	54
<b>Figura 4.34.</b> Simulación del seguimiento de camino del dron, con $W = -0.6$ , y un ángulo entre líneas de $262.72$	55
<b>Figura 4.35.</b> Simulación del seguimiento de camino del dron, con $W = -0.6$ , y un ángulo entre líneas de $262.34$	55
<b>Figura 4.36.</b> Comparativa entre caminos a) ángulo entre líneas menor que $270$ y b) ángulo entre rectas mayor que $270$ .	56
<b>Figura 4.37.</b> Simulación del camino Hélice con $W = -0.1$ , con ganancia de $1$ y $3$ obstáculos	57
<b>Figura 4.38.</b> Simulación del camino Hélice con $W = -0.1$ , con ganancia de $3$ y $3$ obstáculos	58
<b>Figura 4.39.</b> Simulación del camino Hélice con $W = -0.1$ , con ganancia de $3$ y $3$ obstáculos	58



<b>Figura 4.40.</b> Respuesta del sistema de control de seguimiento de camino: Hélice con 3 obstáculos, $W = -0.9$ a) con <i>Ganancia</i> = 0 y b) <i>Ganancia</i> = 2.5.....	59
<b>Figura 4.41.</b> Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en $P1 = (0, -4, 1)$ , $P2 = (0, 4, 3)$ , $P3 = (4, 0, 7)$ y $W = -0.1$ a) <i>Ganancia</i> = 3, y b) <i>Ganancia</i> = 16.....	61
<b>Figura 4.42.</b> Respuesta del sistema de control de seguimiento de camino: Senoidal con 3 obstáculos, $W = -1$ a) con <i>Ganancia</i> = 0 y b) <i>Ganancia</i> = 2.2.....	62
<b>Figura 4.43.</b> Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en $P1 = (0, -4, 1)$ , $P2 = (0, 4, 3)$ , $P3 = (4, 0, 7)$ y $W = -0.1$ con <i>Ganancia</i> = 1.6.....	63
<b>Figura 4.44.</b> Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en $P1 = (0, -4, 1)$ , $P2 = (0, 4, 3)$ y $P3 = (4, 0, 7)$ $W = -0.1$ y <i>Ganancia</i> = 1.7.....	64
<b>Figura 4.45.</b> Respuesta del sistema de control de seguimiento de camino: Senoidal con 3 obstáculos, $W = -0.9$ a) con <i>Ganancia</i> = 0 y b) <i>Ganancia</i> = 2.3.....	64
<b>Figura 4.46.</b> Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en $P1 = (0, 1, 5)$ , $P2 = (0, -2, 9)$ y $P3 = (4, -8, 13)$ $W = -0.1$ a) <i>Ganancia</i> = 2.4 y b) <i>Ganancia</i> = 3.3.....	66
<b>Figura 4.47.</b> Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado a un lado del camino.....	67
<b>Figura 4.48.</b> Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino .....	67
<b>Figura 4.49.</b> Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino.....	68
<b>Figura 4.50.</b> Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino.....	68
<b>Figura 4.51.</b> Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino.....	69

## Índice de tablas

ANEXO I.....	76
ANEXO II .....	92
ANEXO III .....	97
ANEXO IV.....	102
ANEXO V.....	107
ANEXO VI.....	112
ANEXO VII.....	116
ANEXO VIII.....	138
ANEXO IX.....	155
ANEXO X.....	174
ANEXO XI.....	177
ANEXO XII.....	183
ANEXO XIII.....	188
ANEXO XIV.....	193

# 1. Introducción

## 1.1. Justificación

Las unidades autónomas voladoras (UAV) son un tipo de robot aéreo automático (no necesitan de la manipulación de un hombre para su funcionamiento), estas son utilizadas actualmente en muchas aplicaciones de la agricultura, la ingeniería, entre otras, por lo que se realizan estudios en busca de mejorar su modelado y su control.

El control de un dron aéreo se puede realizar de manera manual o automática. Los controles automáticos permiten que los robots puedan cumplir las tareas programadas sin intervención del hombre. Los controles utilizados actualmente en las UAV pueden ser: Proporcional Integral Derivativo (PID), Basados en métodos numéricos (Euler o Newton), Adaptativos, entre otros.

La modelación y simulación de una UAV permite el estudio del comportamiento que tendrá un dron volador al seguir un camino en 3 dimensiones. Esto permite identificar como responde el tipo de control utilizado para la corrección de la ruta del dispositivo cuando éste se ha desviado del camino planteado, como se puede verificar en los trabajos publicados por los autores Andaluz, Sásig, Chicaiza, y Velasco (2017) y González, Afanador, y Niño (2019).

Los métodos numéricos son una herramienta matemática que permite la solución de ecuaciones diferenciales mediante la aplicación de procesos iterativos (repetir el cálculo de una aproximación hasta que el resultado se semejante al real, sin que sea necesario la función que describe el proceso). La utilización de los métodos numéricos, como herramientas de control para el seguimiento de trayectorias y caminos, está siendo estudiado en la actualidad y su aplicación permite trasladar a un robot a través de un área determinada con una cantidad de los datos considerablemente menor, debido a que se trata de un método iterativo.

En este trabajo se propone una novedosa técnica basado en métodos numéricos, cuyas principales características son: no necesitar de cálculos complejos para alcanzar la señal de control y la simplicidad en la realización de las operaciones matemáticas. Además, el algoritmo es de fácil comprensión e implementación, lo cual permite la adaptación directa a cualquier microcontrolador sin necesidad de hacer uso de un computador externo. Debido a que no es un algoritmo complejo, se puede ejecutar en controladores de baja capacidad de procesamiento.

## 1.2. Planteamiento del trabajo

Existen diferentes formas de controlar un dron, como la manual o planificando sus movimientos con anterioridad. Por otro lado, las Unidades Autónomas Voladoras (UAV) tienen la ventaja de no necesitar de una persona o una planificación de su movimiento para llegar al lugar indicado.

La modelación y simulación de una UAV permite el estudio del comportamiento que tendrá un dron volador al seguir un camino en 3 dimensiones, lo cual permite identificar la respuesta del tipo de control utilizado para la corrección de la ruta del dispositivo cuando este se ha desviado del camino planteado. Este tipo de control se basa en métodos numéricos, mediante una continua retroalimentación que permite corregir la ruta del UAV en todas las partes del camino.

Con base a estos antecedentes, el presente trabajo pretende aportar al estudio del control de seguimiento de camino mediante métodos iterativos de un robot UAV, al identificar su funcionamiento, los parámetros en los que el controlador funciona y sus limitaciones.

## 1.3. Estructura de la memoria

El presente trabajo se desarrolla en los capítulos II a V, de la siguiente manera:

Capítulo II: Se entabla los conceptos básicos necesarios para el desarrollo del presente trabajo, como el uso de Matlab para programar y la representación de una simulación, la descripción de las Unidades Autónomas Voladoras (UAV) y sus planteamientos de su modelo matemático, los sistemas de control comunes y su funcionamiento, y finalmente la clasificación y usos de los métodos numéricos; además, se realiza un análisis de la bibliografía existente de investigaciones similares.

Capítulo III: se plantean los objetivos, generales y específicos, y la metodología del trabajo, la cual está compuesta de los pasos que se van a seguir para realizar el modelado, la simulación y el análisis de los resultados.

Capítulo IV: Se divide en 3 secciones: Desarrollo del modelo, Simulación, y Análisis de datos. En la primera parte se desarrollan los modelos de la UAV, del control de seguimiento de camino y del modelo de evasión de obstáculos; en el segundo apartado se realiza la implementación en Matlab, la simulación del control de seguimiento del camino y la

verificación del sistema; y en el tercer apartado se analizan los datos obtenidos de las simulaciones con la finalidad de observar el comportamiento del dron al seguir los caminos Hélice, Senoidal y Líneas, sin y con obstáculos y obtener los valores en los que la UAV completa los caminos con el menor error y menores oscilaciones.

Capítulos V: Se realizan las conclusiones del trabajo que están relacionada con el modelado de la UAV y sistema de evasión de obstáculos, la simulación del sistema de control por medio de Matlab y el análisis de los datos obtenido. Además, se plantean los trabajos futuros que pueden aportar al desarrollo de la presente línea de investigación del TFM realizado.

## 2. Contexto y estado del arte

### 2.1. Marco Teórico

Para el desarrollo del presente trabajo se realizó una investigación bibliográfica de las UAV, sistemas de control, métodos numéricos y conceptos de modelado y simulación.

#### 2.1.1 Unidad Autónoma Voladora

En 1920 se acuñó el término 'robot', mecanismos replicantes de los seres humanos, los cuales tienen la función de facilitar el trabajo realizado por el hombre. El desarrollo mecánico, eléctrico y computacional han permitido que actualmente encontremos robots en nuestros hogares que realizan actividades de limpieza y que pueden imitar la fisonomía y los gestos de una persona (Salazar, 2019).

Un robot es una máquina desarrollada para realizar una actividad específica, la cual puede ser realizada con o sin la ayuda del hombre, gracias a un conjunto de mecanismos, sensores, etc. En la actualidad existen robots manipuladores, móviles, de servicio, de campo (agricultura y ganadería), de defensa y seguridad, rehabilitadores, entre otros (García, 2015).

Dentro del campo de la defensa y seguridad, los robots son utilizados en la industria militar por su menor tiempo de reacción, no se cansan y pueden tener un mejor campo de visión. En este sentido, los drones fueron desarrollados por el ejército de USA, desde 1916 cuando Elmer Sperry inventó un mecanismo de control remoto, y en la actualidad tienen la finalidad de poder realizar misiones sin poner en riesgo la vida de los seres humanos, por lo que pueden realizar tareas de alto riesgo; además, al poder ser impulsados por energía solar o nuclear, pueden estar en el aire hasta por 24 horas (Salazar, 2019; Jordán y Baqués, 2014).

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), más conocidos en inglés como UAV, se usan tanto en aplicaciones militares como civiles. Se clasifican según el diseño de sus alas en ala fija o rotativa (estos últimos se pueden encontrar con 3,4,6 o 8 motores, tomando el nombre de tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octacópteros, respectivamente). Es importante mencionar que el manejo de estos modelos es similar ya que internamente están conformados de una tarjeta que se encarga del análisis dinámico del robot, por lo cual el usuario no manipula independiente cada motor sino la dirección y la velocidad a la que quiere que este se dirija (Adeva, 2020; Torres, 2016).

Es así que una UAV puede ser considerado como un vehículo no tripulado que puede desenvolverse en una localidad sin la necesidad de una intervención del hombre en el seguimiento de su trayectoria o camino. Sus aplicaciones pueden ser tanto en la guerra como en la mensajería, como lo demuestra Amazon con el diseño de los drones Prime Air que pueden entregar paquetes a distancias de hasta 24 Km de máximo 5 lb en 30 minutos (ABC, 2019; Adeva, 2020).

### **2.1.2 Sistemas de control**

Los obreros eran los responsables de mantener los procesos en funcionamiento por lo que tenían que comandar y regular las entradas a un sistema para obtener el producto deseado. Con la revolución industrial y la producción en masa, se volvieron más frecuentes las operaciones continuas y monótonas, lo que llevó a incrementar el número de enfermedades ocupacionales (Daneri, 2008).

Debido a esto, los sistemas de control nacen con la finalidad de controlar los procesos que se desarrollan dentro de la industria, donde la intervención del hombre es parcial o nula, lo cual permite disminuir los riesgos causados por diseños ergonómicamente inadecuados o por movimientos repetitivos, posturas forzadas y/o sobreesfuerzos. Con esto se pudieron obtener mejores parámetros de calidad del producto, menores tiempos de producción, disminución en la incidencia de accidentes laborales y enfermedades profesionales, entre otros (Roca , 2014; Daneri, 2008).

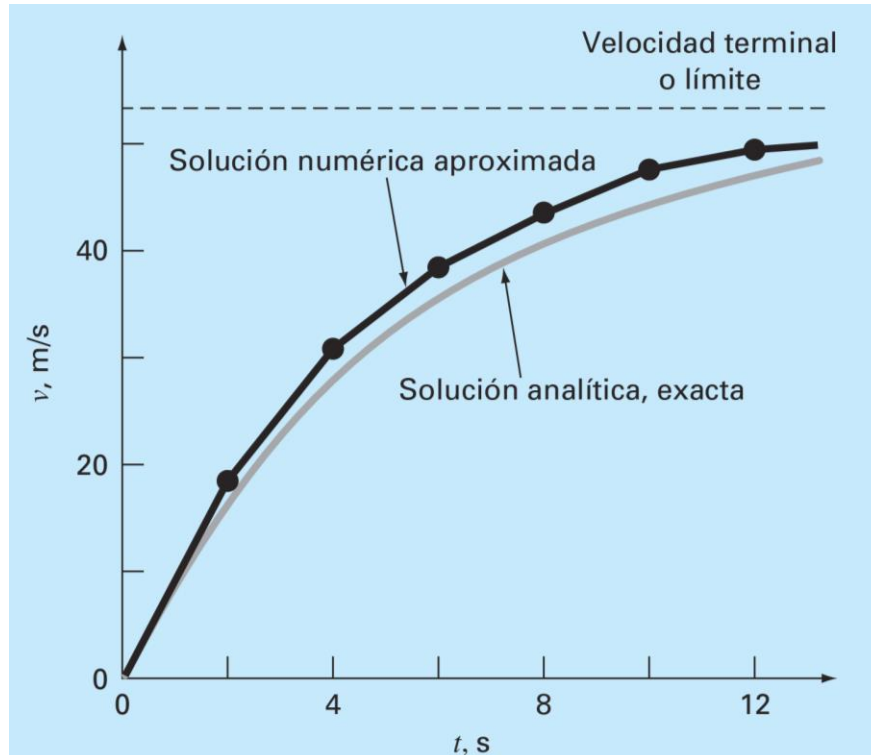
En cuanto a los sistemas de control, estos pueden ser de lazo abierto y lazo cerrado. El primero tiene una calibración inicial, la cual no es monitoreada, siendo un ejemplo de este sistema un control de temperatura que se calibra solo a través de una perilla y el actuador suministra la energía necesaria para que la temperatura alcance el valor deseado; sin embargo, el controlador en realidad desconoce si está o no cumpliendo con lo solicitado. Por otro lado, el control a lazo cerrado tiene una retroalimentación que permite estar constantemente monitoreando y corrigiendo el ambiente por medio del actuador (Daneri, 2008).

Dentro de los sistemas de control más conocidos se encuentran el control ON – OFF y el control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Los controles ON – OFF tienen mayor aplicación en los sistemas cuya variación de la variable es lenta (como ocurre en los sistemas de control de temperatura) mientras que los controles PID son se adaptan en mayor medida a los sistemas que varían en el tiempo debido a que su acción proporcional corrige la cuantía del actuador en proporción a la desviación y la integral tiene un efecto lento que resulta en un efecto que se anticipa a los cambios de valor del sistema (Roca , 2014).

Para finalizar es importante mencionar que los primeros drones tuvieron altos índices de accidentes; sin embargo, con la aplicación de nuevas tecnologías como Predator y Reaper, la frecuencia de incidentes disminuyó de 62.06 por 100 000 horas de vuelo en 2001 a 5.13 en 2011. Las mejoras de estas tecnologías están enfocadas tanto en la dinámica del robot como en los sistemas de control utilizados y actualmente las redes neuronales, fuzzy logic, los sistemas de control predictivos y adaptativos, permiten mejorar la fiabilidad de estos dispositivos. A pesar de esto, esta es una ciencia que está continuamente en evolución (Jordán y Baqués, 2014).

### 2.1.3 Métodos Numéricos

Las ecuaciones diferenciales permiten entender el comportamiento del mundo que nos rodea, ya que son modelos matemáticos que expresan a los fenómenos que se dan en la naturaleza. Existen expresiones que poseen una solución analítica, pero en la mayoría de las ecuaciones son extensos los cálculos para resolverlas o no se pueden resolver, razón por la cual el desarrollo de métodos numéricos permite tener un conjunto de puntos aproximados de la solución, tal como se puede observar en la Figura 2.1 (Chapra y Canele, 2006).



**Figura 2.1** Respuesta de la solución analítica versus la aproximada  
Fuente: (Chapra y Canele, 2006, p. 18)



Dentro de los métodos numéricos de resolución de una ecuación diferencial ordinaria (EDO) se encuentran los métodos de Euler, Runge Kutta, Newton, entre otros, los cuales permiten tener resultados aproximados / discriminados de la función analizada y cada uno de estos presenta características propias de velocidad de convergencia, estabilidad, etc. Su aplicación permite disminuir la cantidad de datos analizados por la computadora, debido a que son discretos, y facilita los cálculos para encontrar la solución de las EDOs (Vázquez, Jiménez, Aguirre, y Pascual, 2009)

El método de Euler se puede obtener por diferenciación numérica, integración numérica y desarrollo de Taylor; la ecuación resultante se presenta en la Ec [2.1] y tiene un error global acumulado de  $O(h)$ , para la función  $y_{k+1}$ . Por otro lado, el método Runge Kutta de 4 etapas (RK4), por medio de integración numérica, permite obtener la expresión visualizada en la Ec [2.2] y posee un error global acumulativo de  $O(h^4)$ , lo cual indica que los valores obtenidos se aproximan más a los reales conforme aumenta el número de particiones (Vázquez, et al, 2009).

## 2.1.4 Modelado y Simulación

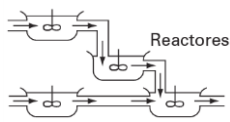

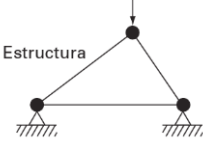
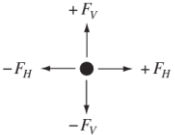
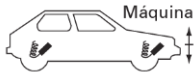
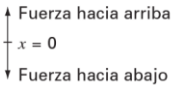
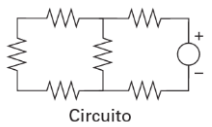
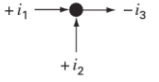
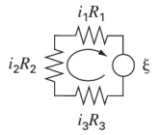
### 2.1.4.1 Modelado

Un modelo matemático expresa un fenómeno físico, químico, biológico, entre otros, mediante un conjunto de fórmulas (como se puede observar en la Tabla 2.1) que generalmente se expresan como funciones (como se presenta en la EC [1], donde la variable dependiente da la característica del sistema, las independientes pertenecen a dimensiones como tiempo y espacio), los parámetros que reflejan las características del sistema y las funciones de fuerza que se generan por el medio exterior (Chapra y Canele, 2006).

$V. dependiente = f(V. independiente, parámetro, función de fuerza)$

Ec [1]

**Tabla 2.1** Modelos matemáticas de dispositivos conocidos

Campo	Dispositivo	Principio de aplicación	Expresión matemática
Ingeniería química		Conservación de la masa	Balace de la masa: Entrada $\rightarrow$ Salida 
Ingeniería civil		Conservación del momentum	En un periodo $\Delta \text{masa} = \text{entradas} - \text{salidas}$ Equilibrio de fuerzas: 
Ingeniería mecánica		Conservación del momentum	En cada nodo $\sum \text{fuerzas horizontales } (F_H) = 0$ $\sum \text{fuerzas verticales } (F_V) = 0$ Equilibrio de fuerzas: 
Ingeniería eléctrica		Conservación de la carga  Conservación de la energía	$m \frac{d^2x}{dt^2} = \text{Fuerza hacia abajo} - \text{fuerza hacia arriba}$ Balance de corriente: En cada nodo $\sum \text{corriente } (i) = 0$   Balance de voltaje:   Alrededor de cada malla $\sum \text{fems} - \sum \text{caída de potencial en los resistores} = 0$ $\sum \xi - \sum iR = 0$

Adaptación de: (Chapra y Canele, 2006)

El proceso de modelado se desarrolla en 3 etapas (Moralena y Villaba, 2013):

- 1) Formulación del modelo: consiste en encontrar el sistema de ecuaciones que rigen en sistema, las cuales que pueden ser lineales o no lineales.
- 2) Verificación del modelo: se centra en verificar si el modelo cumple con los requisitos de diseño.
- 3) Validación del modelo: se comparan los valores obtenidos en el simulador con los datos reales obtenidos en el campo.

Al considerar su clasificación, los modelos matemáticos pueden ser deterministas o estocásticos; los modelos deterministas tienen sus variables de entrada determinadas, mientras que los estocásticos poseen algunas variables aleatorias. También se pueden

considerar los modelos estáticos o dinámicos; los modelos estáticos no dependen del tiempo, a diferencia de los dinámicos, en los cuales si hay esta dependencia y se clasifican en tres categorías: de tiempo discreto, evento discreto y tiempo continuo (Moralena y Villaba, 2013).

Finalmente, en cuanto a la validación de un modelo, existe la validez replicativa, predictiva y estructural. La primera requiere que los resultados se encuentren en una tolerancia aceptable, la segunda exige adicionalmente la existencia de la habilidad de predecir, y la tercera implica la posibilidad de reproducir el comportamiento componente a componente (Moralena y Villaba, 2013).

#### **2.1.4.2 Simulación**

La simulación por computadora permite analizar un sistema, mediante la cual un objeto se puede interpretar como un sistema del cual se desea obtener información. Es así que, para analizar (por ejemplo, el desempeño de un obrero, una bodega, un mecanismo, una UAV, etc.) y obtener datos, se debe realizar una experimentación. Este proceso idealmente debe ser real, pero a veces esto no es posible debido a los posibles costos elevados que el proceso acarrea, los peligros asociados, entre otros motivos, por lo que es recomendable el uso de ordenadores para simular los procesos (Moralena y Villaba, 2013).

Los conceptos básicos en una simulación son: estados del sistema, cada uno de los cuales corresponde a un instante de tiempo en el análisis; las entidades (todo que puede provocar una alteración en el estado del sistema); los atributos, los cuales hacen referencia a las propiedades de las entidades; la actividad o evento, que corresponde a un proceso que conlleva a cambios en el sistema; las variables de estado, las cuales dan a conocer el estado del experimento; el reloj, el cual permite tener conocimiento el tiempo en el que se está desarrollando el sistema, sea absoluto o relativo (Moralena y Villaba, 2013).

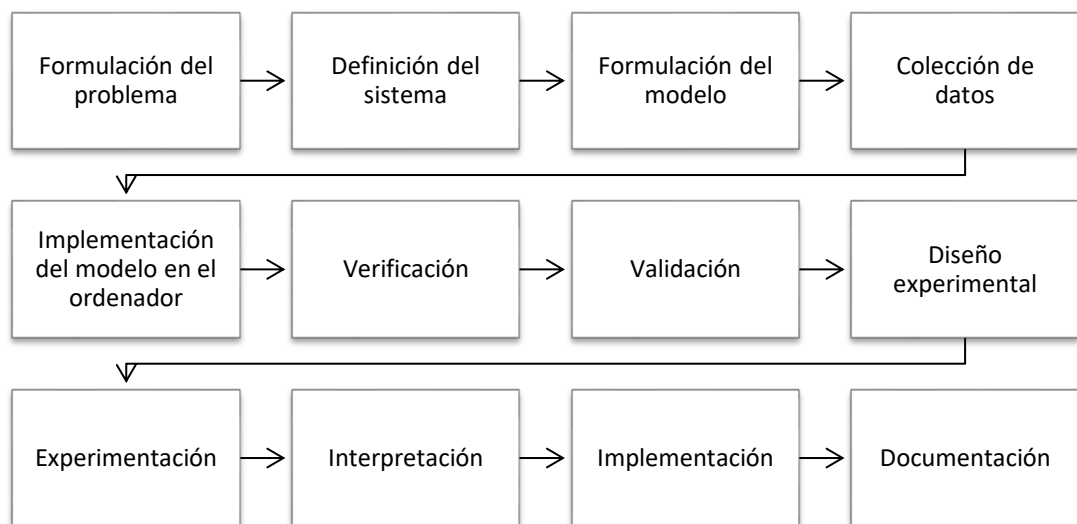
Las etapas propicias para el desarrollo de una simulación son (Moralena y Villaba, 2013):

- 1) Formulación del problema: en esta etapa se entablan los objetivos y la finalidad de realizar el trabajo.
- 2) Definición del sistema: conlleva la determinación específica de las características del sistema, incluido sus fronteras y sus interrelaciones con el exterior.
- 3) Colección de datos: en esta etapa se buscan los datos generados por investigaciones y sirve para formalizar el modelo de forma correcta.

- 4) Implementación del modelo en el ordenador: conlleva al uso del ordenador para facilitar el proceso de cálculo.
- 5) Verificación: verifica funcionamiento del modelo.
- 6) Validación: comparación de los resultados obtenidos con los reales.
- 7) Diseño experimental: define los tiempos de simulación, valores de ganancia, entre otros.
- 8) Experimentación: desarrolla la simulación.
- 9) Interpretación: analiza la respuesta del sistema frente a la variación de sus parámetros; es decir, su sensibilidad.
- 10) Implementación: utiliza el simulador implementado.
- 11) Documentación: conlleva la generación de manuales de uso.

En la Figura 2.2 se puede observar un resumen de las diferentes etapas.

**Figura 2.2** Esquema de etapas que se desarrollan en el proceso de simulación



Adaptación de: (Morelena y Villaba, 2013)

## 2.2. Estado del Arte

Gonzales y Afanador (2019) analizan el modelado dinámico de un dron de 4 motores (quadrotor), en el cual se obtuvo las matrices de rotación de los 3 ángulos directores y lo expresan en la matriz de rotación; mediante la formulación de Euler-Lagrange, expresan el movimiento traslacional y rotacional con seis grados de libertad; finalmente, luego de la aplicación de diferentes criterios, obtienen las fórmulas de  $G_z(s)$ ,  $G_\theta(s)$ ,  $G_\phi(s)$  y  $G_\psi(s)$ , las cuales son ingresadas en simulink para analizar su comportamiento.

En el trabajo de Olegovych y Yakovych (2019) se plantea el uso de redes sensores especiales TDOA, las cuales permiten la detección específica del UAV y facilita el proceso de cálculo al no requerir la inversión de matrices complejas. De esta manera el dron puede estar continuamente retroalimentado y se puede realizar un control de su trayectoria.

Los autores Heredia, Castro y Oliveira (2019) plantean el método IPM (Interior Point Method) que utiliza la técnica del predictor – corrector de Mehrotra, el cual tiene una mejor eficiencia computacional; sin embargo, el sistema se vuelve mal acondicionado en el cálculo de la dirección, lo cual dificulta su aplicación y aumenta el uso de memoria; mediante una técnica de precondicionamiento basado en el método de Newton, se logra disminuir la memoria utilizada. En otra investigación los autores Rosales, Scaglia, Mut, y Sciascio (2009) utilizan el método de Euler para diseñar el sistema de control de vehículos terrestres, mientras que, en el trabajo de Acosta, Andaluz, Rivera, y Salas (2019) para la evasión de obstáculos se utiliza la técnica de fuerza ficticia modificada, la que repele al dron de los objetos cercanos al camino.

Bastidas y Beauchchamp (2016) proponen la comparación de 3 métodos de control óptimo: el Regulador cuadrático Lineal (LQR) con observador, Regulador cuadrático Lineal Gaussiano (LQG) y LQG/LTR, donde LTR es el Loop Transfer Recovery, mediante el análisis de controlabilidad, observabilidad y estabilidad se obtuvo que el LQG/LTR tiene un mejor valor de desempeño.

En otra propuesta del modelo de control de una UAV se estudia la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos, en el cual se plantea el algoritmo de guiado L1 sobre el modelo de dron Skywalker x8, donde se realiza la linealización del algoritmo y las posteriores pruebas de seguimiento de caminos rectos y curvos, los cuales se encuentran trazados en 2 dimensiones (Hernández, Valeriano, Hernández, y Hernández , 2017).

En el trabajo Andaluz, et al (2017) los métodos algebraicos y numéricos han sido utilizados para el seguimiento de trayectorias de drones en 2D en investigaciones para el diseño de controladores de robot móviles, en la cual se utiliza la regla de integración trapezoidal para generar un modelo de control iterativo, mientras que, en el trabajo Scaglia, Quintero y Sciascio (2009) plantean un controlador manipulador móvil de un modelo cinemático de un dron, en la cual se utiliza la aproximación de Euler para generar el algoritmo de control de un robot móvil con evasión de obstáculos. Además, en la publicación de los autores Sciascio, Rosales, Eduardo, y Mut (2006) se plantea un control de métodos numéricos para problemas no lineales clásicos con el uso de Euler como la adaptación para un sistema de control del modelo Rotacional-Translation Actuador (RTAC).

**Tabla 2.2** Resumen de artículos revisados de temas relevantes para el desarrollo del trabajo

Núm	Artículo	Modelado del dron				Sistema de seguimiento		Sistema de control					Método Iterativo			Evasión de obstáculo		Alcance del proyecto		
		Cinemático		Dinámico		Trayectoria	Camino	Predictor corrector	Basado en Sistemas Iterativos	Basado en redes de sensores	Control Óptimo	Algoritmo de guiado L1	Newton	Euler	Algebraico	2D	3D	Modelo matemático	Simulación	Sistema real
		(2D)	(3D)	(2D)	(3D)															
1	A New Hybrid Preconditioner for the Interior Point Method.							X	X								X			
2	Modelamiento y simulación de un quadrotor mediante la integración de Simulink y SolidWorks.				X												X	X		
3	Adaptive Filtration of Parameters of the UAV Movement Based on the TDOA-Measurement Sensor Networks				X	X					X						X	X		
4	Aplicación de Técnicas de Control Óptimo a una plataforma estacionaria cuatrimotor				X	X					X						X	X		
5	Estudio sobre la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en UAV	X					X				X						X	X		
6	Linear Algebra Applied to Kinematic Control of Mobile Manipulators	X				X			X				X		X		X	X		
7	Diseño de un controlador basado en métodos algebraicos: aplicaciones a robótica móvil	X				X			X				X	X			X	X		
8	Diseño de un controlador mediante métodos numéricos para un problema no lineal clásico								X				X				X	X		
9	Energy-Saber Mobile Manipulator Based on Numerical Methods	X			X	X			X				X				X	X		
10	Navegación de Robots Móviles en Entornos no Estructurados utilizando Álgebra Lineal	X					X		X				X		X		X	X	X	
	Proyecto Actual	X					X		X				X			X	X	X		

(Elaboración propia)

De la Tabla 2.2 se puede concluir que existen investigaciones concernientes a los temas de drones. En lo que se refiere al modelado, se observa que los artículos 2,3,4 y 9 realizan un modelado Dinámico en 3D, mientras que en los artículos 5 a 10 se centran en el modelo cinemático. Para el sistema de control se plantean el artículo 1 con el predictor-corrector, los artículos 6 a 10 se utilizan sistemas iterativos como Newton, Euler o Algebraico y el artículo 4 el control óptimo. En lo que respecta a la evasión de obstáculos, los artículos 6 y 10 plantean alternativas en el plano 2D. Finalmente, se puede observar que solo el artículo 10 tiene una aplicación real y los trabajos presentados en los artículos 1 a 9 se centran en el modelado y simulación.

Por otro lado, la Tabla 2.2 muestra que 7 trabajos de los 10 consultados utilizan métodos iterativos, como Euler y Newton, para el desarrollo de métodos de control. Esto destaca el interés del estudio de esta técnica para el desarrollo de las UAV. Además, se encuentra 2 investigaciones que utilizan estrategias de evasión de obstáculos en 2D.

El presente trabajo tiene la finalidad de aportar a estas investigaciones en la propuesta del modelo matemático de la UAV, en la modificación de los sistemas de control por métodos iterativos (Euler) y en la adición del sistema de evasión de obstáculos aplicados a un ambiente en 3D. Los resultados obtenidos permitirán determinar la respuesta del control de seguimiento de camino al variar sus parámetros de funcionamiento, identificando de esta manera las características del controlador y sus limitaciones. Los resultados de esta investigación se complementarán con las investigaciones realizadas y permitirán generar conocimiento relevante en lo referente a la aplicación de los métodos numéricos como parte de sistemas de control.

## 3. Objetivos concretos y metodología de trabajo

### 3.1. Objetivo general

Modelar y simular el control de seguimiento de un robot UAV, mediante la aplicación de métodos iterativos, para observar de su comportamiento en 3D.

### 3.2. Objetivos específicos

- Obtener el modelo matemático de la UAV, mediante la aplicación de criterios geométricos.
- Desarrollar un sistema de control de seguimiento de camino, mediante el método de Euler.
- Simular el comportamiento del dron, mediante la utilización de Matlab,
- Analizar la respuesta del sistema al seguimiento de los caminos: Hélice, Senoidal y Líneas, sin y con obstáculos.

### 3.3. Metodología del trabajo

La Figura 2.2 sirve como referencia para el planteamiento de la presente metodología, en la cual se consideran partes como la definición del sistema, la formulación del modelo, la colección de datos y la implementación del modelo en el ordenador. La mayor parte de estos temas son tomados en consideración dentro de los apartados Desarrollo del modelo, Simulación y Análisis de Datos, los cuales conforman la estructura del presente trabajo.

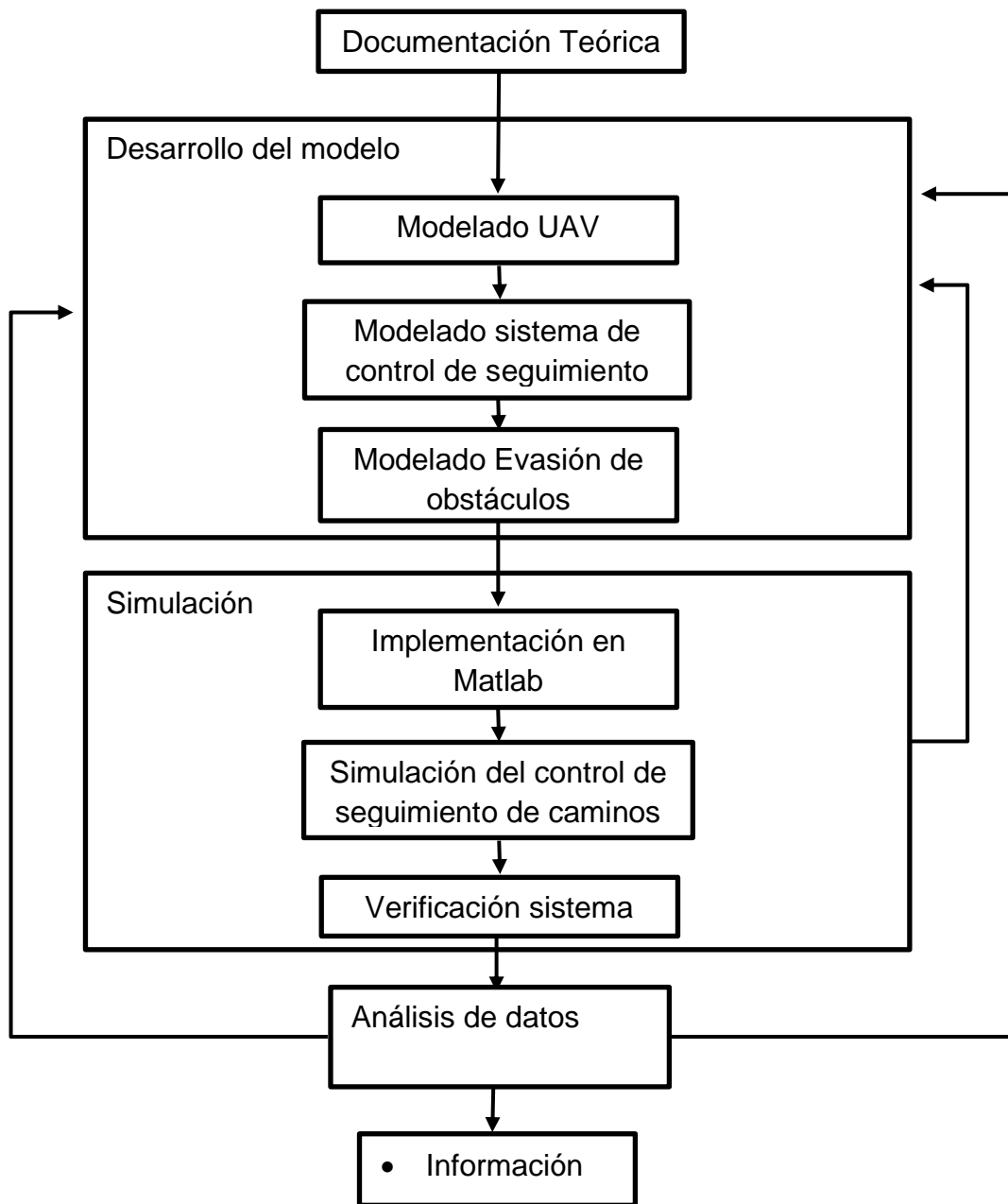
Para la metodología de este trabajo se plantea 3 etapas principales, como se observa en la Figura 3.2:

**Desarrollo del modelo:** contempla las condiciones del sistema que se va a analizar, para posteriormente, tomando en consideración estos criterios desarrollar los modelos de la UAV, del control de seguimiento de caminos y de la evasión de obstáculos en 3D.

**Simulación:** en esta fase se realiza la implementación en Matlab y las pruebas del sistema frente a los caminos Hélices, Senoidal y Líneas.

**Análisis de datos:** conlleva al análisis de los resultados obtenidos de la respuesta del sistema frente a los experimentos planteados.





**Figura 3.1.** Resumen de la metodología planteada para el presente trabajo.  
(Elaboración propia)

### 3.3.1 Desarrollo del modelo

En esta etapa se obtienen los modelos matemáticos de la UAV, el control de seguimiento de caminos y el de evasión de obstáculos. Además, se plantean los criterios iniciales que permiten definir las características y el alcance del proyecto.

Definición del sistema: aquí se plantean las condiciones iniciales del tipo de proyecto que se va a realizar, junto con el alcance y lo que se espera obtener.

Modelado del UAV: en esta etapa se construye el modelo de la UAV con base en criterios geométricos y se plantean las ecuaciones que describen las características cinemáticas del robot y su comportamiento.

Modelado del control de seguimiento de camino: con base al modelo matemático de la UAV, obtenido en el subtema anterior, se aplica el método de Euler y criterios de corrección de la ruta para el diseño del controlador; además, se realiza el análisis de estabilidad mediante la aplicación de la transformada z.

Modelado del método de evasión de obstáculos: en este apartado se aplica la técnica de fuerza ficticia modificada, mediante la cual se pretende que el dron sea capaz de evadir obstáculos que se encuentren ubicados en el espacio.

### 3.3.2 Simulación

Este subtema tiene 3 principales objetivos: el primero comprende al desarrollo del código en Matlab, que permita la implementación de la simulación; el segundo contempla la simulación del control de seguimiento de caminos; y, el tercero se refiere a la verificación del sistema, para el planteo de mejoras.

Implementación en Matlab: está comprendido en etapas; la primera corresponde al ingreso del código del modelo matemático de la UAV con su sistema de control y la técnica de evasión de obstáculos, la segunda conlleva a la implementación del panel y por último se obtiene el enlace entre estos para poder observar la simulación.

Simulación del control de seguimiento de caminos: corresponde a la etapa de experimentación, en la cual se realiza diferentes pruebas manipulando las variables y se observan los resultados; las pruebas se van a realizar a tres tipos de curvas (segmentos de línea recta, una curva en el espacio y una función sinusoidal); además, se modificarán los valores de la técnica de evasión de obstáculos para constatar la variación en el movimiento de la UAV.

Verificación del sistema: sobre la base de los resultados obtenidos, se verifican el funcionamiento de los modelos acorde a lo planteado y, en caso de que existan problemas, se realizarán las respectivas correcciones.

Análisis de Datos: en este apartado se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones, tanto los errores generados, como la facilidad o dificultad generadas para que el robot realice el seguimiento de caminos; para esto se toma en consideración los valores de ganancia suministrados y las variaciones en los parámetros de la técnica de evasión de obstáculos.

## 4. Desarrollo específico de la contribución

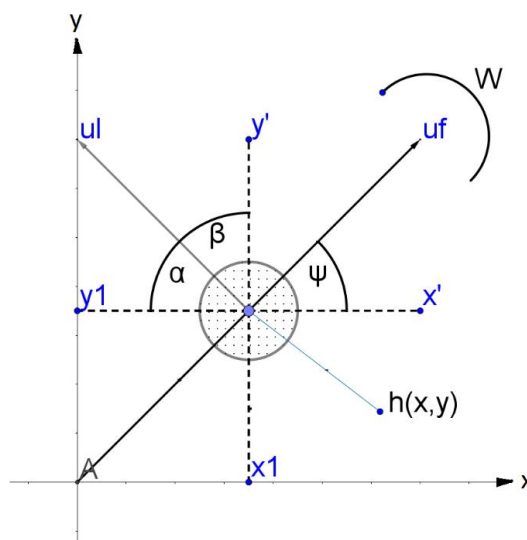
En este capítulo se detalla el procedimiento seguido en el presente trabajo. Los subíndices propuestos son los que están mencionados en el apartado 3.3 Metodología del trabajo, y está compuesto por: La etapa de desarrollo del modelo, Simulación y Análisis de datos.

### 4.1. Desarrollo del modelo

Este apartado contempla el desarrollo de los modelos matemáticos de la UAV, el control de seguimiento del camino y la técnica de evasión de obstáculos.

#### 4.1.1 Modelado del UAV

La construcción del modelo matemático de la UAV se la realiza en 2 etapas: la primera se muestra en la Figura 4.1, en la cual se realiza un análisis cinemático de la UAV, en el plano XY, tomando en consideración la velocidad frontal ( $u_f$ ), velocidad lateral ( $u_l$ ), aceleración angular ( $W$ ) y los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\varphi$ .



**Figura 4.1.** Representación del dron en 2D. (Elaboración propia)

El punto  $h(x, y)$  está conformado por los valores  $h_{x_1} = x_1$  y  $h_{y_1} = y_1$  y sus derivadas son  $\dot{h}_{x_1}$  y  $\dot{h}_{y_1}$ , respectivamente. Las velocidades de los ejes  $\dot{h}_{x_1}$  y  $\dot{h}_{y_1}$  se pueden deducir de la Figura 4.1, utilizando las componentes de x e y de los vectores de velocidad frontal ( $u_f$ ) y la lateral ( $u_l$ ), como se puede observar en la EC [1].

$$\begin{aligned} \dot{h}_{x_1} &= u_f \cos(\varphi) - u_l \sin(\beta) \\ \dot{h}_{y_1} &= u_f \sin(\varphi) + u_l \cos(\beta) \end{aligned} \quad \text{EC [ 1 ]}$$

Mediante la aplicación de la geometría, se pueden plantear los ángulos en función de otros ángulos, tal como se puede observar en la EC [2].

$$\alpha + \varphi + 90 = 180 \quad \text{EC [ 2 ]}$$

$$\alpha + \beta = 90 \Rightarrow \alpha = 90 - \beta \quad \text{EC [ 3 ]}$$

Remplazando la E [3] en E [2] se obtiene la E [4]

$$90 - \beta + \varphi + 90 = 180 \Rightarrow \beta = \varphi \quad \text{EC [ 4 ]}$$

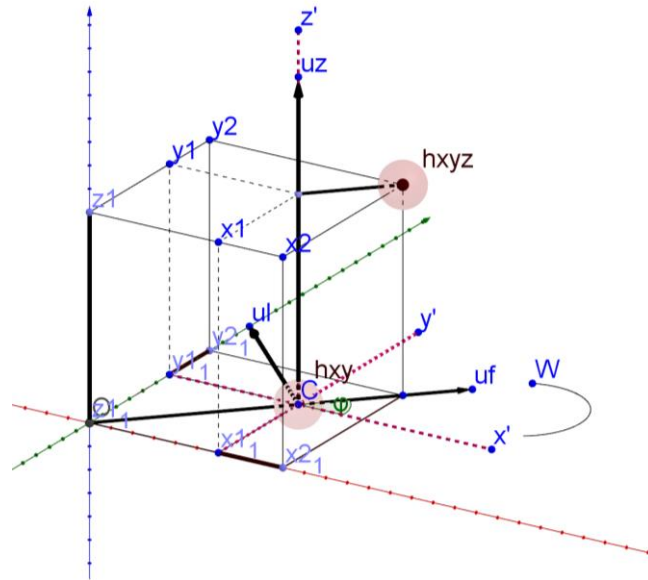
Aplicando la EC [4] en la EC [1], y tomando en consideración que la derivada de  $\varphi$  es la velocidad angular, se obtiene el sistema de ecuaciones EC [5]

$$\begin{aligned} \dot{h}_{x_1} &= u_f \cos(\varphi) - u_l \sin(\varphi) \\ \dot{h}_{y_1} &= u_f \sin(\varphi) + u_l \cos(\varphi) \\ \dot{\varphi} &= \omega \end{aligned} \quad \text{EC [ 5 ]}$$

Expresado en forma matricial, se obtiene la EC [ 6 ]

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_{x_1} \\ \dot{h}_{y_1} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ \omega \end{bmatrix} \quad \text{EC [ 6 ]}$$

El modelo matemático en la EC [6] expresa el movimiento de un robot en 2D; sin embargo, para poder expresarlo en 3D, se considera la posición en el eje z como  $h_z = z_1$ . Para el diseño del modelo se considera un punto hacia delante  $p_2 = (x_2, y_2) = (h_{x_2}, h_{y_2})$ , como se puede observar en la Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Representación del dron en 3D. (Elaboración propia)

Para la representación del punto  $h_{xyz} = (h_x, h_y, h_z)$  se toma en consideración las ecuaciones EC [7], las cuales están formadas por los puntos  $h_{xy}$  y  $h_{xyz}$ .

$$h_x = h_{x_1} + h_{x_2}.$$

$$h_y = h_{y_1} + h_{y_2}.$$

$$h_z = h_{z_1}.$$

EC [7]

Como se puede observar en la Figura 4.2 las componentes  $h_{x_2}$  y  $h_{y_2}$ , se pueden en función del ángulo  $\varphi$  y el módulo  $a$ , tal como se indica en la EC [8].

$$h_x = h_{x_1} + a \cos(\varphi).$$

$$h_y = h_{y_1} + a \sin(\varphi).$$

$$h_z = h_{z_1}.$$

EC [8]

Aplicando la derivada a la EC [8] se obtiene la EC [9].

$$\dot{h}_x = \dot{h}_{x_1} - a\omega \sin(\varphi).$$

$$\dot{h}_y = \dot{h}_{y_1} + a\omega \cos(\varphi).$$

$$\dot{h}_z = \dot{u}_z.$$

EC [9]

Si a la ecuación EC [9] se le reemplazan los valores de  $\dot{h}_{x_1}$  y  $\dot{h}_{y_1}$  (de la EC [5]) y se añade la derivada del ángulo  $\varphi$  que es  $\omega$ , se obtiene el sistema de ecuaciones de la EC [10]

$$\dot{h}_x = u_f \cos(\varphi) - u_l \sin(\varphi) - a\omega \sin(\varphi).$$

$$\dot{h}_y = u_f \sin(\varphi) + u_l \cos(\varphi) + a\omega \cos(\varphi).$$

$$\dot{h}_z = u_z$$

$$\dot{\varphi} = \omega$$

EC [ 10 ]

El sistema de ecuaciones de la EC [10], expresado de forma matricial, se encuentra en la EC [11]

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_{x_1} \\ \dot{h}_{y_1} \\ \dot{h}_z \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & -a\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & a\cos(\varphi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ u_z \\ \omega \end{bmatrix}$$

EC [ 11 ]

Como se puede observar en la EC [11], el sistema de ecuaciones se puede poner de forma reducida a través del Jacobiano, tal como se observa en la EC [12].

$$\dot{h}(t) = J(q(t))\dot{q}(t)$$

EC [ 12 ]

#### 4.1.2 Modelado del control de seguimiento de camino

El sistema de control de seguimiento de camino está centrado en la aplicación de métodos numéricos, en específico el método de Euler, el mismo que se presenta en la EC [13].

$$y(k+1) = y(k) + t_s f(y, u, t)$$

EC [ 13 ]

En la EC [13] se puede observar el método de Euler con  $y(k+1)$ , el cual se calcula con base de  $y(k)$ ,  $t_s$  y  $f(y, u, t)$  que es el punto anterior en el tiempo. En la EC [14] y la EC [15], se muestra Euler aplicado al modelo de la UAV que se planteó en la EC [12].

$$h(k+1) = h(k) + t_s J(q(t))\dot{q}(t)$$

EC [ 14 ]

$$h(k) = h(k-1) + t_s J(q(t))\dot{q}(t)$$

EC [ 15 ]

El desarrollo del sistema de control de camino y el análisis de estabilidad se realiza tanto para la EC [14] (Euler explícito) como para la EC [15] (Euler implícito), con la finalidad de identificar cuál de los dos métodos conviene implementar.

#### 4.1.2.1 Euler implícito

En el planteamiento del sistema de control, para que el error se aproxime a cero, se propone la EC [16].

$$h(k) = hd(k) - W(hd(k-1) - h(k-1)) \quad \text{EC [16]}$$

Donde la diferencia entre  $hd(k-1) - h(k-1)$  representa el error, con  $hd(k-1)$  y  $h(k-1)$  como la posición deseada y la real del dron en un punto anterior, respectivamente. Además, el error se multiplica por  $W$  que es una matriz diagonal de valores que están dentro del intervalo  $[0, 1]$ .

Igualando la EC [15] con la EC [16] y despejando  $\mathbf{J}(q(t))\dot{q}(t)$  se obtiene la EC [17]

$$\mathbf{J}(q(t))\dot{q}(t) = \frac{hd(k)-h(k-1)}{t_s} - \frac{W(hd(k-1)-h(k-1))}{t_s} \quad \text{EC [17]}$$

De la EC [17] se toma una de las dos fracciones para el cálculo de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , la misma que se presenta en la EC [18], que son parte del diseño del sistema de control de seguimiento de camino.

$$\dot{\mathbf{p}}\mathbf{d}(k) = \frac{hd(k)-h(k-1)}{t_s} \quad \text{EC [18]}$$

Para la simplificación de la ecuación se consideran las siguientes variables, quedando expresada la ecuación como se observa en EC [19]:

- $\mathbf{J} = \mathbf{J}(q(t))$
- $\dot{q}(t) = \dot{q}$
- $\mathbf{b} = \dot{\mathbf{p}}\mathbf{d}(k) - \frac{W(hd(k-1)-h(k-1))}{t_s}$

$$\mathbf{J}\dot{q} = \mathbf{b} \quad \text{EC [19]}$$

Despejando  $\dot{q}$  de la EC [18] se obtiene la EC [20].

$$\mathbf{q}_{ref} = \mathbf{J}^{-1}\mathbf{b} \quad \text{EC [20]}$$

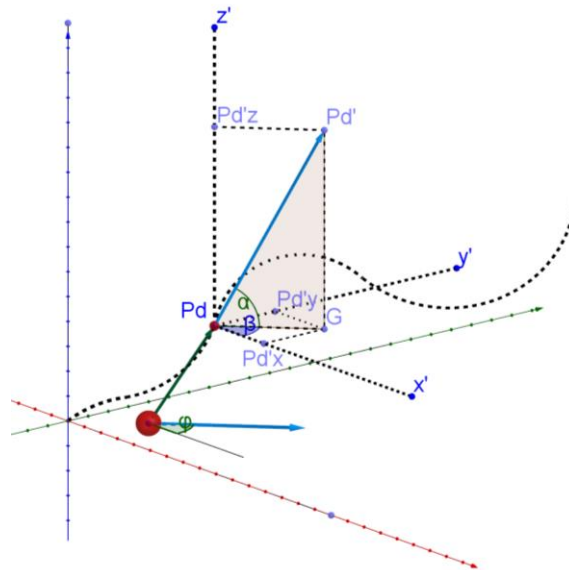


En el trabajo de Andaluz, et al (2017) los autores plantean un manejo semejante del uso de Euler para el diseño del sistema de control de seguimiento de camino, con la diferencia de que este es enfocado al seguimiento de trayectorias.

### Planteamiento del vector $\dot{P}d$ .

La EC [17] es el método de control de trayectorias, que depende del tiempo; para poder plantear un sistema de control de caminos se planteó el  $\dot{P}d(k)$ , el cual es diferente de  $\dot{h}d$ , por lo que se hace necesario plantear un sistema que represente a  $\dot{P}d(k)$ .

En la Figura 4.3 se puede observar el vector  $Pd' = \dot{P}d$ , el mismo que se encuentra en la EC [18]. Además, se visualiza los componentes del vector  $Pd'x = \dot{P}d_x$ ,  $Pd'y = \dot{P}d_y$  y  $Pd'z = \dot{P}d_z$ .



**Figura 4.3.** Representación del camino y del vector  $Pd'$  en función de los componentes y sus ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  en 3D. (Elaboración propia)

Se representa el vector  $\dot{P}d$  en sus componentes  $\dot{P}d_x$ ,  $\dot{P}d_y$  y  $\dot{P}d_z$ , en función de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , a través de las coordenadas esféricas, como se puede visualizar en la EC [21].

$$\dot{P}d_x = |\dot{P}d| \cos \alpha \cos \beta$$

$$\dot{P}d_y = |\dot{P}d| \cos \alpha \sin \beta$$

$$\dot{P}d_z = |\dot{P}d| \sin \alpha$$

$$|\dot{P}d| = V_{max}$$

EC [21]

De manera similar los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  se pueden expresar en función de las componentes  $Pd_x$ ,  $Pd_y$  y  $Pd_z$ , como se indica en la EC [22].

$$\alpha = \tan \frac{\Delta Pd_z}{\sqrt{(\Delta Pd_x)^2 + (\Delta Pd_y)^2}}$$

$$\beta = \tan \frac{\Delta Pd_y}{\Delta Pd_x} \quad \text{EC [ 22 ]}$$

### Análisis de estabilidad

En este apartado se realiza el análisis de estabilidad del sistema de control de seguimiento de caminos, con la aplicación del método de Euler implícito. En la EC [23] se considera la EC [15] despejada.

$$J(q(t))\dot{q}(t) = \frac{hd(k)-h(k-1)}{t_s} \quad \text{EC [ 23 ]}$$

Para el análisis se considera el seguimiento de velocidades perfectas, por lo que  $\dot{q}(t) = \mathbf{q}_{ref}$ . Al remplazar la EC [20] en la EC [23] y simplificando la notación de  $J(q(t))$  por  $J$  se obtiene la EC [24].

$$\frac{hd(k)-h(k-1)}{t_s} = JJ^{-1}\mathbf{b} \quad \text{EC [ 24 ]}$$

Debido a que  $hd(k-1) - h(k-1)$  es el error en un tiempo anterior, el valor de  $\mathbf{b}$  de la EC [17] se puede expresar como  $\dot{P}d - \frac{W}{t_s}h_{e_{ant}}$ . De la EC [24], la expresión  $\frac{hd(k)-h(k-1)}{t_s}$  es la variación de la posición en función del tiempo (velocidad), por lo que se puede expresar como  $\dot{h}$  y por último  $JJ^{-1} = 1$ ; tomado esto en consideración se obtiene la EC [25]

$$\dot{h} = \dot{P}d - \frac{W}{t_s}h_{e_{ant}} \quad \text{EC [ 25 ]}$$

Se puede calcular el error de la diferencia entre la velocidad deseada versus la real, tal como se indica en la EC [26].

$$\dot{h}_e = \dot{h}d - \dot{h} \quad \text{EC [ 26 ]}$$

Al remplazar la EC [25] en EC [26] y al despejar se obtiene la EC [27].

$$\dot{h}d - \dot{h}_e - \dot{h}d = \dot{P}d - \frac{W}{t_s} h_{e_{ant}} \quad \text{EC [ 27 ]}$$

Como se mencionó en el **planteamiento del vector  $\dot{P}d$** ,  $\dot{P}d \neq \dot{h}d$ , por lo que su diferencia genera un error que se denotara como  $\dot{\delta}_e$ , tal como se puede observar en la EC [28].

$$\dot{\delta}_e = \dot{h}d - \dot{P}d \quad \text{EC [ 28 ]}$$

Despejando la EC [27] y remplazando en la EC [28] se obtiene la EC [29], de la cual todos sus elementos están en función de errores, por lo que se puede realizar el análisis de estabilidad.

$$\dot{\delta}_e = \dot{h}_e - \frac{W}{t_s} h_{e_{ant}} \quad \text{EC [ 29 ]}$$

Tanto  $\dot{\delta}_e$  como  $\dot{h}_e$  se puede expresar como la diferencia de sus posiciones en un tiempo  $t_s$ , tal como se encuentra en la EC [30].

$$\frac{\delta_{e_x}(k) - \delta_{e_x}(k-1)}{t_s} = \frac{h_{e_x}(k) - h_{e_x}(k-1)}{t_s} - \frac{W_x h_{e_x}(k-1)}{t_s}$$

$$\delta_{e_x}(k) - \delta_{e_x}(k-1) = h_{e_x}(k) - h_{e_x}(k-1) - W_x h_{e_x}(k-1) \quad \text{EC [ 30 ]}$$

Como se puede observar en la EC [30], todas las variables están en función de  $x$ , debido a que la EC [29] es una función matricial en términos de  $x$ ,  $y$  y  $z$ , y el análisis de estabilidad se lo puede realizar en solo uno de sus componentes.

Sacando factor común  $h_{e_x}(k-1)$  en la EC [30], se obtiene la EC [31].

$$\delta_{e_x}(k) - \delta_{e_x}(k-1) = h_{e_x}(k) - h_{e_x}(k-1)[1 + W_x] \quad \text{EC [ 31 ]}$$

Algunos de los métodos de análisis de estabilidad son: Dimensión de Correlación, Gráficos de Recurrencia o Ploteo Recurrente y Exponente de Lyapunov. Debido a que el sistema que se va a analizar es discreto, para el presente trabajo, se aplica la transformada  $z$  para el análisis de estabilidad del sistema de control del seguimiento de caminos. En la EC [32] se encuentra el resultado de aplicar la transformada  $z$  a la EC [31].

$$\Delta_{e_x}(z)[1 - z^{-1}] = H_{e_x}(z)[1 - (1 + W_x)z^{-1}] \quad \text{EC [ 32 ]}$$

Despejando  $H_{e_x}(z)$  de la EC [32], se obtiene la EC [33].

$$H_{e_x}(z) = \frac{\Delta_{e_x}(z)[1-z^{-1}]}{[1-(1+W_x)z^{-1}]} \quad \text{EC [ 33 ]}$$

De la EC [33] se encuentra que la estabilidad depende de  $(1 + W_x)$ , dentro de los intervalos de 0 a 1, tal como se ve en la EC [34]

$$\begin{aligned} 0 < (1 + W_x) < 1 \\ -1 < W_x < 0 \end{aligned} \quad \text{EC [ 34 ]}$$

En la EC [34] se obtiene que el sistema es estable en el intervalo de  $(-1,0)$  para  $W_x$ .

#### 4.1.2.2 Euler explícito

Los pasos seguidos para el diseño del control de seguimiento de camino son similares a los presentados en el subtema 4.1.3.1 Euler implícito, por lo que en este apartado no se presentara a detalle todos los pasos seguidos.

La EC [14] es el método numérico de Euler explícito, para trabajar con esta ecuación se plantea la EC [35], la cual busca que los errores tiendan a cero.

$$h(k+1) = hd(k+1) - W(hd(k) - h(k)) \quad \text{EC [ 35 ]}$$

Al igualar la EC [14] con la EC [35], se obtiene la EC [36].

$$J(q(k))\dot{q}(k) = \frac{hd(k+1)-h(k)}{t_s} - \frac{W(hd(k)-h(k))}{t_s} \quad \text{EC [ 36 ]}$$

De la EC [36] se hace el cambio mostrado en la EC [37].

$$\dot{p}d_1(k) = \frac{hd(k+1)-h(k)}{t_s} \quad \text{EC [ 37 ]}$$

Para la EC [38], se toma en consideración lo siguiente:

$$- \mathbf{J} = \mathbf{J}(q(t))$$

- $\dot{q}(t) = \dot{q}$
- $b_1 = \dot{P}d_1(\mathbf{k}) - \frac{W(hd(k)-h(k))}{t_s}$

$$J\dot{q} = b_1 \quad \text{EC [ 38 ]}$$

Despejando la EC [38] se obtiene la EC [39].

$$q_{ref1} = J^{-1}b_1 \quad \text{EC [ 39 ]}$$

De forma análoga se obtiene una ecuación semejante a la conseguida en el trabajo de Andaluz, et, (2017)

### Planteamiento del vector $\dot{P}d$ .

Como se mencionó en el **planteamiento del vector  $\dot{P}d$**  en **4.1.3.1 Euler implícito** el vector  $\dot{P}d_1(\mathbf{k})$  sirve para el diseño del control de seguimiento, aplicando el mismo procedimiento del apartado anterior se obtienen la EC [40] y EC [41].

La EC [40] muestra las componentes del vector  $\dot{P}d_1(\mathbf{k})$ .

$$\begin{aligned} \dot{P}d_{1x} &= |\dot{P}d_1| \cos \alpha \cos \beta \\ \dot{P}d_{1y} &= |\dot{P}d_1| \cos \alpha \sin \beta \\ \dot{P}d_{1z} &= |\dot{P}d_1| \sin \alpha \\ |\dot{P}d_1| &= V_{max} \end{aligned} \quad \text{EC [ 40 ]}$$

En la EC [41] se encuentra los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ .

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{\Delta P d_z}{\sqrt{(\Delta P d_x)^2 + (\Delta P d_y)^2}} \\ \beta &= \tan^{-1} \frac{\Delta P d_y}{\Delta P d_x} \end{aligned} \quad \text{EC [ 41 ]}$$

### Análisis de estabilidad

Despejando la EC [14] se obtiene la EC [42].

$$J(q(t))\dot{q}(t) = \frac{hd(k+1)-h(k)}{t_s} \quad \text{EC [ 42 ]}$$

Al tomar en consideración lo del apartado anterior, se realiza el sistema entre la EC [39] y EC [42] y se obtiene la EC [43].

$$\frac{hd(k+1)-h(k)}{t_s} = JJ^{-1}b_1 \quad \text{EC [ 43 ]}$$

Continuando con el procedimiento se obtiene la EC [44].

$$\dot{h}_1 = \dot{P}d_1 - \frac{W}{t_s}h_e \quad \text{EC [ 44 ]}$$

Se plantea la ecuación de errores EC [45].

$$\dot{h}_e = \dot{h}d - \dot{h}_1 \quad \text{EC [ 45 ]}$$

Al remplazar la EC [44] en EC [45] y al despejar, se obtiene la EC [46]

$$\dot{h}d - \dot{h}_e = \dot{P}d_1 - \frac{W}{t_s}h_e \quad \text{EC [ 46 ]}$$

Como  $\dot{P}d \neq \dot{h}d$  se plantea la EC [47].

$$\dot{\delta}_e = \dot{h}d - \dot{P}d_1 \quad \text{EC [ 47 ]}$$

Despejando la EC [47] y remplazando en la EC [46], se obtiene la EC [48].

$$\dot{\delta}_e = \dot{h}_e - \frac{W}{t_s}h_e \quad \text{EC [ 48 ]}$$

Construido la EC [48], la cual solo está en términos del error, se procede a poner en términos de  $k$  y  $k + 1$ , como se puede observar en la EC [49].

$$\delta_{e_x}(k + 1) - \delta_{e_x}(k) = h_{e_x}(k + 1) - h_{e_x}(k) - W_x h_{e_x}(k) \quad \text{EC [ 49 ]}$$

Factorizando la EC [49] se obtiene la EC [50].

$$\delta_{e_x}(k+1) - \delta_{e_x}(k) = h_{e_x}(k+1) - h_{e_x}(k)[1 + W_x] \quad \text{EC [ 50 ]}$$

Aplicando la transformada z a la EC [50] se obtiene la EC [51]

$$\Delta_{e_x}(z)[z^{-1} - 1] - z^{-1}\delta_{e_x}(0) = H_{e_x}(z)[1 - (1 + W_x)z^{-1}] - z^{-1}\delta_{e_x}(0) \quad \text{EC [ 51 ]}$$

Como se observa en la EC [51] existe un error constante  $\delta_{e_x}(0)$ , lo que ocasiona que en sistema no llega a estabilizarse, por lo que el control de seguimiento de camino diseñado a partir del método de Euler explícito, no es estable.

Mediante los resultados del análisis de estabilidad de los subcapítulos 4.1.3.1 Euler implícito y 4.1.3.2 Euler explícito se puede concluir que el método que el método numérico que se va a aplicar para la simulación es Euler implícito.

### 4.1.3 Modelado del método de evasión de obstáculos

Una de las técnicas de evasión de obstáculos se conoce como campos potenciales, la cual genera un campo alrededor del obstáculo que el dron evita, mientras menor sea la distancia de la UAV al objeto, mayor va a ser la fuerza de repulsión que este genera (Samaniego y Vaca, 2017, p. 27).

Para este trabajo, se considera a los obstáculos como esferas centradas en  $\xi_0$ , a  $\xi$  como la posición real del robot,  $r_0$  como el radio de la esfera y a  $\phi$  como el campo potencial; todo esto incluido en la EC [52] (Samaniego y Vaca, 2017, p. 28).

$$\phi_{t,x_j} = \frac{r_0^2}{(\xi - \xi_0)^T(\xi - \xi_0)} - \lambda(\xi - \xi_0)^T(\xi - \xi_0) \quad \text{EC [ 52 ]}$$

La EC [52] es la ecuación modificada donde  $\xi_0 = [h_{x0}; h_{y0}; h_{z0}]$  y  $\xi = [h_x; h_y; h_z]$ .

En la EC [53] se plantea la distancia de la UAV del objeto, la misma que se puede reducir como  $r_0 + d_{seg}$ , donde la  $d_{seg}$  es la distancia de seguridad entre el objeto y el dron (Samaniego y Vaca, 2017, p. 29).

$$d_{UAV-obs} = \sqrt{(\xi - \xi_0)^T(\xi - \xi_0)} = r_0 + d_{seg} \quad \text{EC [ 53 ]}$$

El valor de  $\lambda$  de la EC [52] se calcula a través de la EC [54].

$$\lambda = \frac{r_0^2}{(r_0 + d_{seg})^4} \quad \text{EC [ 54 ]}$$

De las EC [52], EC [53] y EC [54] se observa que  $\phi_{t,x_j} = 0$  si  $d_{UAV-obs} > r_0 + d_{seg}$ .

Al tomar en consideración las ecuaciones de la 52 a la 54, se plantea la ecuación de evasión de obstáculos para las componentes  $\dot{h}_x$ ,  $\dot{h}_y$  y  $\dot{h}_z$ , lo que se puede observar en la EC [55] (Samaniego y Vaca, 2017, pp. 29, 30).

$$\begin{aligned} \dot{h}_x &= -2\lambda(h_x - h_{x0}) - \frac{r_0^2(2h_x - 2h_{x0})}{((h_x - h_{x0})^2 + (h_y - h_{y0})^2 + (h_z - h_{z0})^2)^2} \\ \dot{h}_y &= -2\lambda(h_y - h_{y0}) - \frac{r_0^2(2h_y - 2h_{y0})}{((h_x - h_{x0})^2 + (h_y - h_{y0})^2 + (h_z - h_{z0})^2)^2} \\ \dot{h}_z &= -2\lambda(h_z - h_{z0}) - \frac{r_0^2(2h_z - 2h_{z0})}{((h_x - h_{x0})^2 + (h_y - h_{y0})^2 + (h_z - h_{z0})^2)^2} \end{aligned} \quad \text{EC [ 55 ]}$$

## 4.2. Simulación

Para la simulación se plantea una fase de implementación en Matlab, donde se detalla la programación realizada en el software. También, se realiza la simulación en el software y por último se realiza la verificación del sistema.

### 4.2.1 Implementación en Matlab

La implementación en Matlab se la realizo de la siguiente manera.

#### 4.2.1.1 Implementación del sistema de control con evasión de obstáculos.

**Encabezado.** – En esta parte se declaran y se inicializan las variables, como el tiempo se simulación (tf), tiempo de muestreo (ts), distancia al punto de control (a), posición inicial del robot, etc.

```
clc
clear
```



close all

```
tf=30;
ts=0.1;
t=0:ts:tf;
N = length(t);
```

```
x(1) = 0;
y(1) = 4;
z(1) = 0;
yaw(1)= 0*(pi/180);
```

```
a=0.1;
```

```
hx(1)=x(1)+a*cos(yaw(1));
hy(1)=y(1)+a*sin(yaw(1));
hz(1) = z(1);
```

**Configuración del camino.** – Comprende en el ingreso del camino que va a seguir la UAV.

```
%%%%%%%%%%%% Camino deseado Hélice %%%%%%%%%%%%%%
```

```
paso = 0.001;
p=0:paso:4*pi;
```

```
pxd = 4*sin(p); % camino deseado en el eje x en (m)
pyd = 4*cos(p); % camino deseado en el eje y en (m)
pzd = 0.5*p;
```

```
yawd = pi/4;
```

**Cálculo del os ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ .** – Se ingresan las ecuaciones para el cálculo de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ .

```
beta = zeros(1,Q); % ángulo beta
alpha = zeros(1,Q); % ángulo gamma
```

```
% Cálculo de ángulos
```

```
for k=1:Q
    if k==1
        % Euler hacia adelante
        beta(k)=atan2(pyd(k+1)-pyd(k),pxd(k+1)-pxd(k));
        alpha(k) = atan2(pzd(k+1)-pzd(k),sqrt((pxd(k+1)-pxd(k))^2+(pyd(k+1)-pyd(k))^2));
    else
        % Euler hacia atrás
        beta(k)=atan2(pyd(k)-pyd(k-1),pxd(k)-pxd(k-1));
        alpha(k) = atan2(pzd(k)-pzd(k-1),sqrt((pxd(k)-pxd(k-1))^2+(pyd(k)-pyd(k-1))^2));
    end
end
```

```
vMax=1; % Velocidad máxima
```

**Implementación del control de seguimiento de caminos.** – Aquí se muestra las líneas de código programadas para la implementación del control de caminos.

```
for k=1:N
    % Control de seguimiento de caminos
    minimo=100;
    for i=1:Q
        aux=sqrt((pxd(i)-hx(k))^2+(pyd(i)-hy(k))^2+(pzd(i)-hz(k))^2); % Distancia
        if aux<minimo
            minimo=aux;
            pos=i;
        end
    end

    %a) Errores
    hxe(k) = pxd(pos) - hx(k);
    hye(k) = pyd(pos) - hy(k);
    hze(k) = pzd(pos) - hz(k);

    yawe(k) = yawd - yaw(k);
```

```

% Error anterior
if k==1
    AntError=[hxe(k);hye(k);hze(k);yaw(k)]; % vector de errores;
else
    AntError=[hxe(k-1);hye(k-1);hze(k-1);yaw(k-1)];% vector de errores;
end

% Matriz Jacobiana (Modelo Cinemático)
J=[cos(yaw(k)) -sin(yaw(k)) 0 -a*sin(yaw(k));...
   sin(yaw(k))  cos(yaw(k)) 0  a*cos(yaw(k));...
   0      0      1      0;...
   0      0      0      1];

% Matriz de diagonal de ganancia entre 0 y 1
W = -0.1*[1 0 0 0;...
          0 1 0 0;...
          0 0 1 0;...
          0 0 0 1];

% Calculo de velocidades deseadas
pxdp(k)=vMax*cos(alpha(pos))*cos(beta(pos));
pydp(k)=vMax*cos(alpha(pos))*sin(beta(pos));
pzdp(k)=vMax*sin(alpha(pos));

pdp=[pxdp(k);pydp(k);pzdp(k);0]; % Vector de velocidades

h = [hx(k);hy(k);hz(k)]; % vector de posición del robot ene le instante k

vo = velocityObstacle(h,ho,gainEvasion,numObstacle,dseg,ro); % Velocidad de evasión

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Robot Simulado%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Aplicar velocidades al robot (Modelo Robot)

```

```

hxp(k)=uf(k)*cos(yaw(k))-ul(k)*sin(yaw(k))-a*w(k)*sin(yaw(k));
hyp(k)=uf(k)*sin(yaw(k))+ul(k)*cos(yaw(k))+a*w(k)*cos(yaw(k));
hzp(k)=uz(k);

```

```

% Calcular posición y orientación del robot

```

```

hx(k+1)=hx(k)+ts*hxp(k);
hy(k+1)=hy(k)+ts*hyp(k);
hz(k+1)=hz(k)+ts*hzp(k);

```

```

yaw(k+1)=yaw(k)+ts*w(k);

```

```

% Calcular posición y orientación del robot en el centro del robot

```

```

x(k+1)=hx(k+1)-a*cos(yaw(k+1));
y(k+1)=hy(k+1)-a*sin(yaw(k+1));
z(k+1) = hz(k+1);

```

```

end

```

**Evasión de obstáculos.** – Se comprende de las líneas de códigos programadas para la ubicación de los obstáculos y para su evasión.

```

clc
clear
close all

```

```

syms hx hy hz hxo hyo hzo ro lambda

```

```

psi = (ro^2/((hx-hxo)^2+(hy-hyo)^2+(hz-hzo)^2))-lambda*((hx-hxo)^2+(hy-hyo)^2+(hz-
hzo)^2);

```

```

J1 = diff(psi,hx);
pretty(simplify(J1))

```

```

J2 = diff(psi,hy);
pretty(simplify(J2))

```

```
J3 = diff(psi,hz);
pretty(simplify(J3))
```

```
% Graficar los obstáculos
```

```
for obs=1:numObstacle
    phi=linspace(0,pi,30);
    theta=linspace(0,2*pi,40);
    [phi,theta]=meshgrid(phi,theta); hold on
    hxo=ro(obs)*sin(phi).*cos(theta)+ho(1,obs);
    hyo=ro(obs)*sin(phi).*sin(theta)+ho(2,obs);
    hzo=ro(obs)*cos(phi)+ho(3,obs);
    h1=mesh(hxo,hyo,hzo); hold on
    set(h1,'EdgeColor',[0,0,0]);
end
```

```
% evasión de obstáculo
```

```
v = pinv(J)*(pdp-W*(AntError/ts))+[vo 0]';
```

```
% Separar acciones de control
```

```
uf(k)=v(1);
ul(k)=v(2);
uz(k)=v(3);
w(k)=v(4);
```

```
%%%%%%%%%Velocidad obstáculos%%%%%%%%%
```

```
function vo = velocityObstacle(h,ho,gainEvasion,obs,dseg,ro)
```

```
hpo = zeros(3,obs);
```

```
for k=1:obs
```

```
    lambda = ro(k)^2/(dseg+ro(k))^4;
```

```
    dUavOstacle = (h(1)-ho(1,k))^2+(h(2)-ho(2,k))^2+(h(3)-ho(3,k))^2;
```

```
    J = [-2*(h(1)-ho(1,k))*((ro(k)/dUavOstacle)^2+lambda),...
        -2*(h(2)-ho(2,k))*((ro(k)/dUavOstacle)^2+lambda),...
        -2*(h(3)-ho(3,k))*((ro(k)/dUavOstacle)^2+lambda)];
```

```

    if sqrt(dUavOstacle)>(dseg+ro(k))
        pf = 0;
    else
        pf = ro(k)^2/dUavOstacle - lambda*dUavOstacle;
    end

    hpo(:,k) = pinv(J)*gainEvasion*-pf;

end

vo(1) = sum(hpo(1,:));
vo(2) = sum(hpo(2,:));
vo(3) = sum(hpo(3,:));

end

```

## Definición de los parámetros del robot y del dibujo del robot

### Parámetros del robot

```

function robotParameters % Función que tiene todos los puntos que forman el robot
load 'octocopter.mat' chasis motor hélice top forward; % Carga los valores de cada elemento
que compone el robot
global Robot; % Variable global

Robot.chasisVertices=chasis.vertices';
Robot.chasisFaces=chasis.faces;

Robot.motorVertices=motor.vertices';
Robot.motorFaces=motor.faces;

Robot.heliceVertices=helice.vertices';
Robot.heliceFaces=helice.faces;

Robot.topVertices=top.vertices';
Robot.topFaces=top.faces;

```

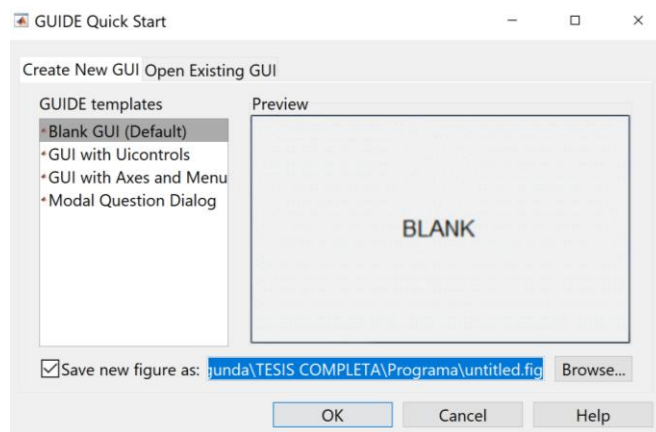
```
Robot.forwardVertices=forward.vertices';
```

```
Robot.forwardFaces=forward.faces;
```

#### 4.2.1.2 Implementación del panel en Matlab

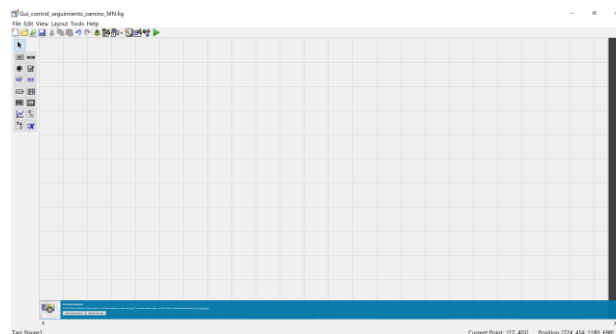
##### Construcción del panel en Matlab

Como etapa inicial, se crea un panel donde se pondrán los objetos de la simulación. Esto se realiza escribiendo `guide` en la ventana de comandos para después seleccionar en `Create New guide`, como se puede observar en la Figura 4.4.



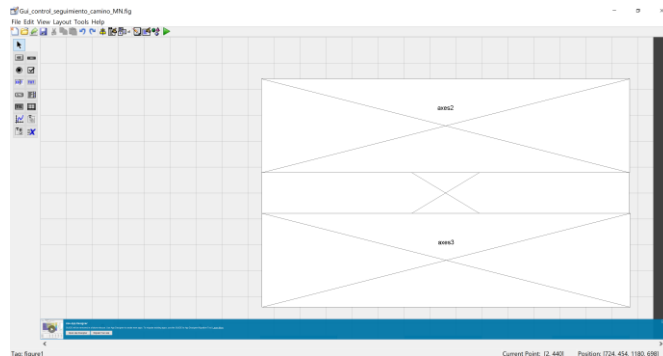
**Figura 4.4** Creación de un nuevo panel en Matlab. (Elaboración propia)

Como se observa en la Figura 4.5, se creó un panel archivo `Control_seguimiento_camino.fig` en el cual se van a integrar los elementos que se van a visualizar en la simulación.



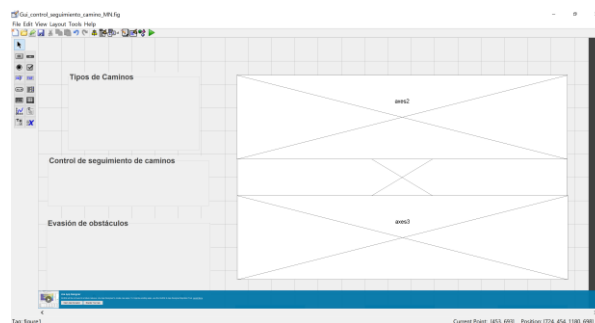
**Figura 4.5** Panel nuevo de Matlab. (Elaboración propia)

Lo primero que se ingresa en el panel son los paneles axes1, axes2 y axes3, los cuales permiten visualizar el movimiento del dron en 3D, la variación de velocidades y la variación de errores, respectivamente, esto se puede observar en la Figura 4.6.



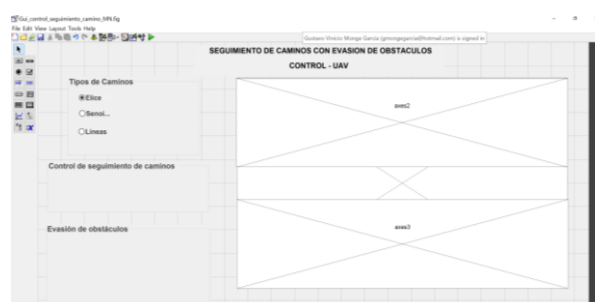
**Figura 4.6** Panel las ventanas axes1, axes2 y axes3. (Elaboración propia)

Se colocan 3 recuadros de texto: tipos de camino, control de seguimiento de camino y evasión de obstáculos, lo que se puede ver en la Figura 4.7.



**Figura 4.7** Panel con los recuadros de textos. (Elaboración propia)

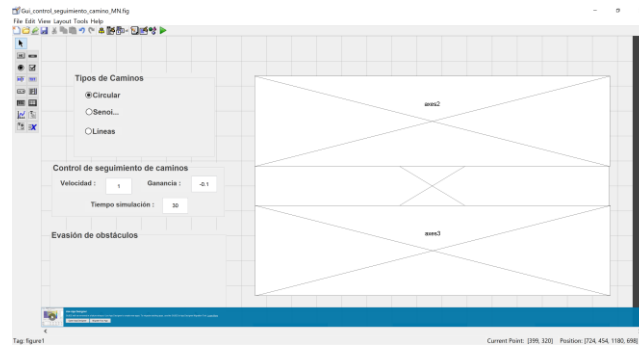
En el recuadro de texto, tipos de camino, se ponen 3 radio button, que son los tipos de camino que van a simulador, los cuales son: Hélice, sinusoidal y Líneas. Lo que se puede observar en la Figura 4.8.



**Figura 4.8** Panel con los tipos de caminos. (Elaboración propia)

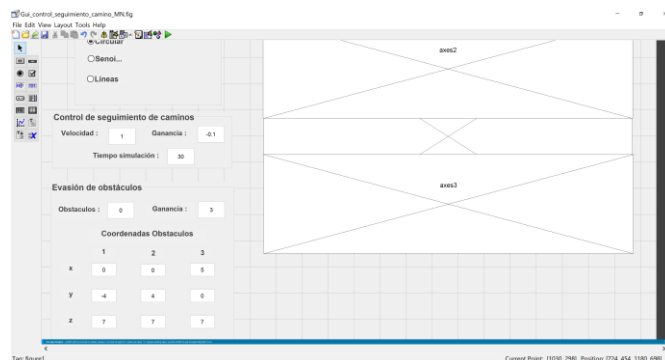


En la Figura 4.9, en el cuadro de texto, control de seguimiento de camino, se colocan 3 textos: Velocidad, Ganancia y Tiempo de simulación; al frente de cada uno de ellos se pone un edit text en los cuales se van a ingresar los valores que se van a cargar en las variables.



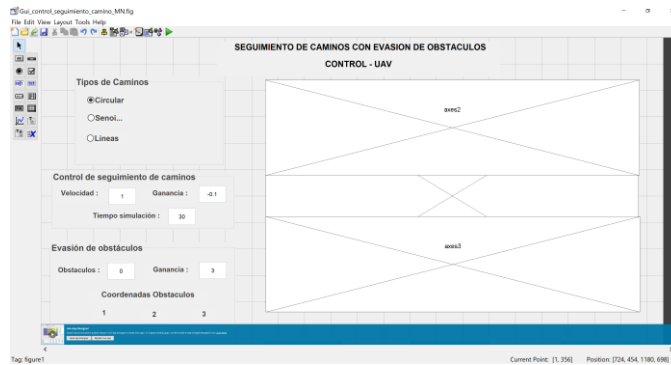
**Figura 4.9** Panel con los edit text para el ingreso de la velocidad, ganancia y tiempo de simulación. (Elaboración propia)

En la Figura 4.10 se puede observar el panel de Matlab con 2 textos (obstáculos y ganancias), con sus respectivos edit text. Además, se coloca un texto (coordenadas obstáculos), abajo del cual se coloca 3 puntos con los valores de x, y u z, donde se van a colocar las 3 coordenadas de los 3 obstáculos.



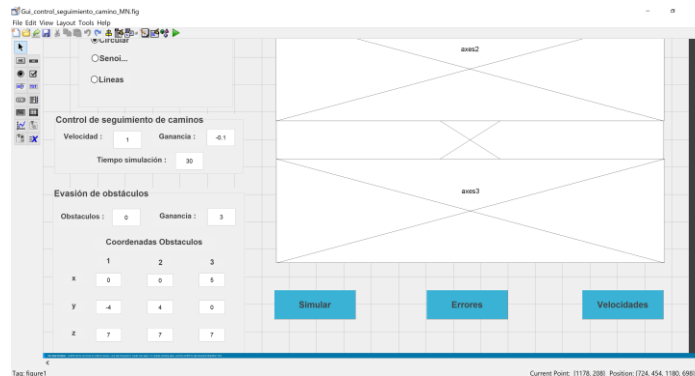
**Figura 4.10** Panel con edit text y listbox para el ingreso de los parámetros para la evasión de obstáculos. (Elaboración propia)

Se coloca un cuadro de texto donde se muestra el título “SEGUIMIENTO DE CAMINOS CON EVACIÓN DE OBSTÁCULOS”, como se puede observar en la Figura 4.11.



**Figura 4.11** Panel con los elementos que se van a utilizar para la simulación.  
(Elaboración propia)

Para finalizar, en la Figura 4.12, se colocan 3 botones que contienen a: Simulador, Errores y Velocidad.



**Figura 4.12** Panel con todos los elementos necesarios para la simulación.  
(Elaboración propia)

En el Anexo I y II se encuentra la completa programación realizada en Matlab.

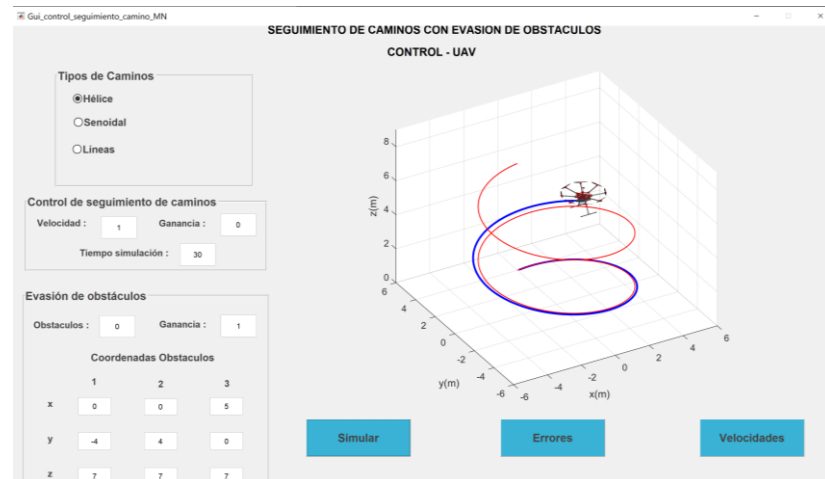
#### 4.2.2 Verificación del sistema

Una vez completada la programación del control de seguimiento de camino y asociado el mismo al panel de simulación, como se puede observar a continuación, se procede a la verificación de la simulación.

El primer tipo de camino que se va a verificar es el Hélice. Los valores de los parámetros se inicializan con:

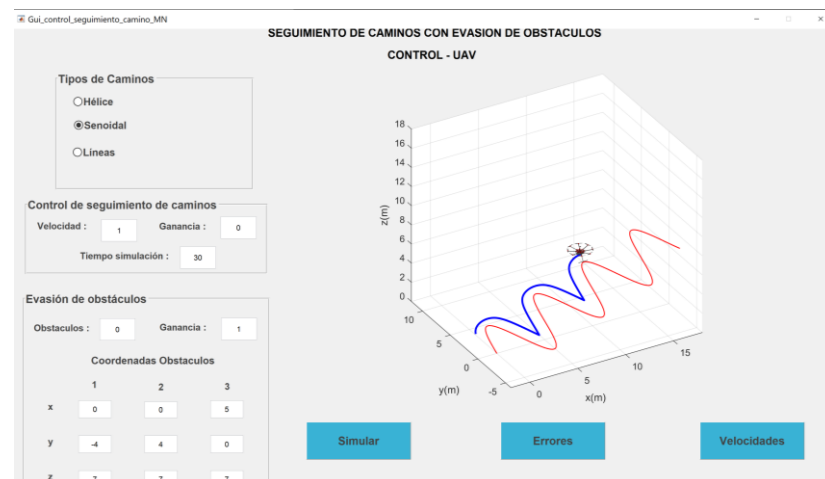
Velocidad = 1, Ganancia (control de seguimiento) = 0, Tiempo de simulación = 30, Obstáculos = 0, Ganancia (evasión de obstáculos) = 1 y los obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 7)$ ,  $P_2 = (0, 4, 7)$  y  $P_3 = (5, 0, 7)$ .

El resultado de la simulación se puede observar en la Figura 4.13.



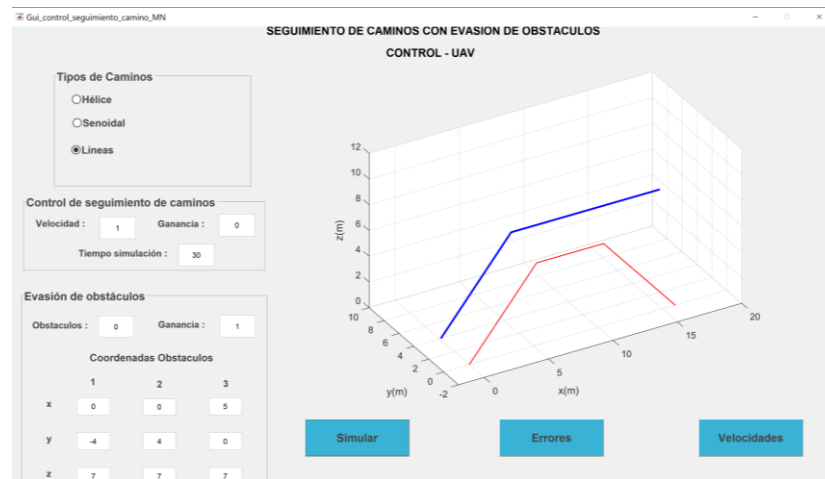
**Figura 4.13** Verificación del control de seguimiento del camino Hélice. (Elaboración propia)

En la Figura 4.14 se observa la verificación de la simulación del control de seguimiento del camino Senoidal considerando los parámetros de la anterior prueba.



**Figura 4.14** Verificación del control de seguimiento del camino Senoidal. (Elaboración propia)

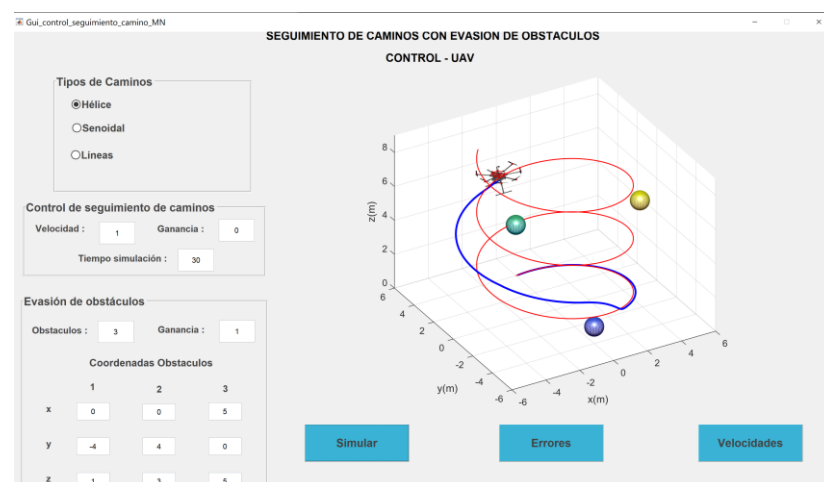
En la Figura 4.14 se observa la verificación de la simulación del control de seguimiento del camino Líneas considerando los mismos parámetros.



**Figura 4.15** Verificación del seguimiento de camino Líneas. (Elaboración propia)

Como se observa en las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15, la simulación se realiza correctamente para los 3 caminos. También, se puede visualizar que el control de seguimiento de caminos no se ha realizado correctamente ya que existe un error constante, lo que se analiza en 4.3. Análisis de Datos.

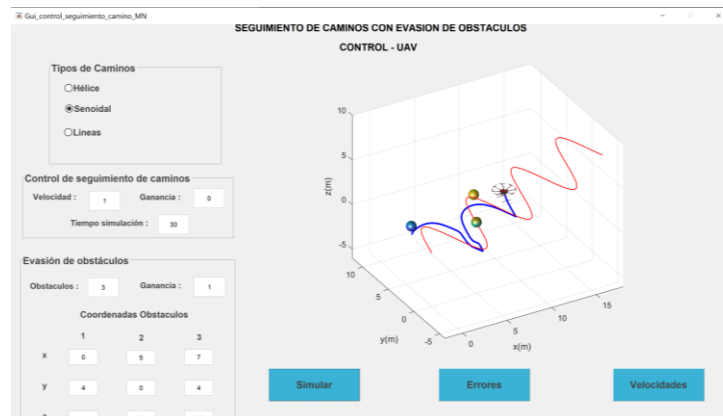
Verificado el control de seguimiento de camino, se procede a poner los obstáculos, para ver la respuesta del método de evasión de obstáculos. En la Figura 4.16 se muestra la simulación del camino Hélice con 3 obstáculos ubicados en los puntos  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (5, 0, 5)$ .



**Figura 4.16** Verificación del control de seguimiento de camino Hélice con 3 obstáculos. (Elaboración propia)

En la Figura 4.16 se puede observar que el dron ha esquivado los objetos, pero el control de seguimiento no ha cumplido su función y no ha regresado a intentar seguir el camino. En 4.3. Análisis de datos se va a analizar con más profundidad la respuesta del sistema.

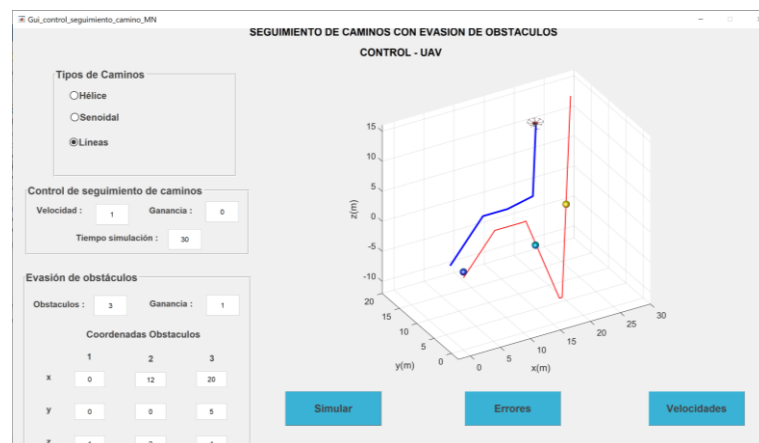
En la Figura 4.17 se muestra la respuesta del control al seguimiento del camino Senoidal con 3 obstáculos ubicados en los puntos  $P_1 = (0,4,1)$ ,  $P_2 = (5,0,2)$  y  $P_3 = (7,4,2.5)$ .



**Figura 4.17** Verificación del control de seguimiento de camino Senoide con 3 obstáculos.  
(Elaboración propia)

En la Figura 4.17 se puede observar que el robot evita los obstáculos puestos en espacio, con lo que se puede verificar el buen funcionamiento del control de seguimiento de camino Senoide con los 3 obstáculos.

La Figura 4.18 muestra la simulación del control de seguimiento de caminos Líneas con 3 obstáculos ubicados en los puntos  $P_1 = (0,0,1)$ ,  $P_2 = (12,0,2)$  y  $P_3 = (20,5,4)$ .



**Figura 4.18** Verificación del control de seguimiento de camino Líneas con 3 obstáculos.  
(Elaboración propia)

Como se observa en la Figura 4.18, el control de seguimiento de caminos Líneas con 3 obstáculos funciona de manera correcta, ya que el dron evito a cada uno de ellos. Además, es importante mencionar que el seguimiento de caminos no se realizó de manera correcta, pero esto se analizará en 4.3. Análisis de Datos.

### **4.3. Análisis de Datos**

El análisis se va a realizar por partes, primero el control de seguimiento de camino para: Hélice, Senoidal y Líneas, donde se observará como responde el controlador a la variación de los parámetros; a continuación, se verá la respuesta del sistema de evasión de obstáculos al agregar 3 objetos en el camino.

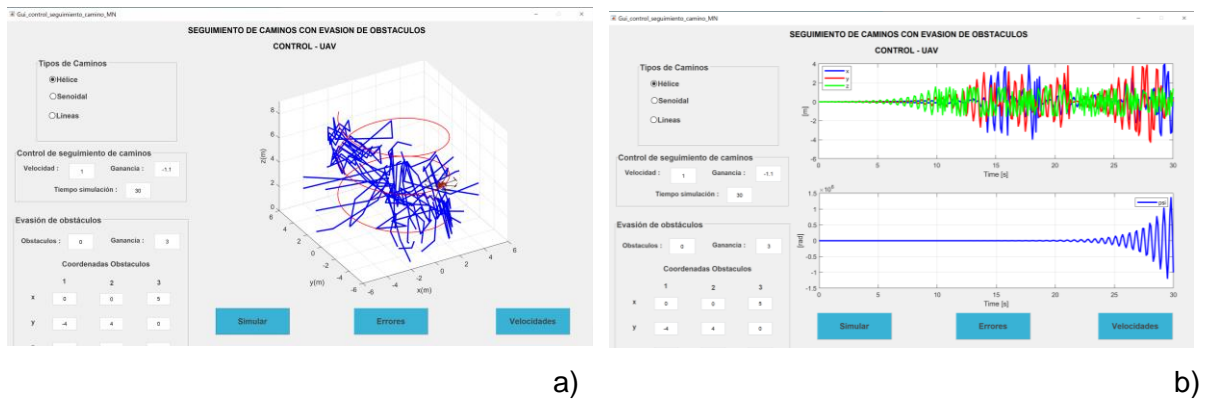
#### **4.3.1 Control de seguimiento de caminos**

Los caminos que se van a analizar son: Hélice, Senoidal y Líneas. Los parámetros que afectan el funcionamiento del modelo son: la velocidad y la ganancia; al modificar estos valores se obtendrá una respuesta del simulador y un registro de los errores y velocidades.

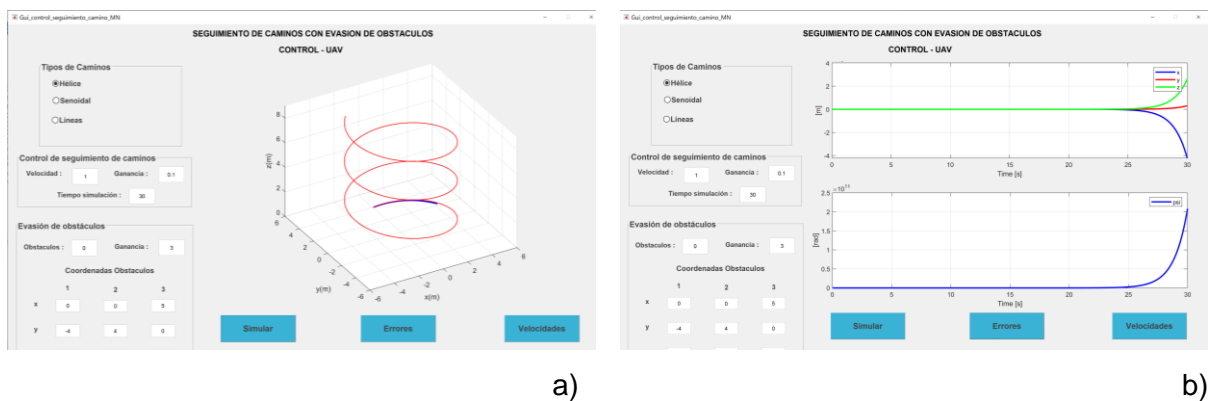
##### **Control de seguimiento de camino: Hélice**

Al realizar la simulación se obtuvo las respuestas mostradas en las Figuras del Anexo III (Figuras AIII.1 a AIII.13), cada una de estas respuestas es la encontrada en la simulación al variaría 0.1 en el valor de la ganancia ( $W$ ) del controlador.

En la Figura 4.19 se observa la respuesta del control de seguimiento de caminos: Hélice, con un valor de ganancia de -1.1. Se puede observar que con este valor el control no cumple su objetivo y comienza a oscilar sin control, mientras que en la Figura 4.20, se utiliza una ganancia de 0.1, lo que ocasiona que el dron sea capaz de seguir el camino, incrementando el error conforme el tiempo aumenta.



**Figura 4.19** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de -1.1 a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W.



**Figura 4.20.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de 0.1 a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W.

Con esto se comprueba el análisis de estabilidad realizado en el literal 4.1.3.1 Euler Implícito, en el cual se encontró que el sistema sería estable cuando la ganancia varía de  $-1 < W < 0$ , con esto se comprueba que el desarrollo teórico de estabilidad se realizó correctamente.

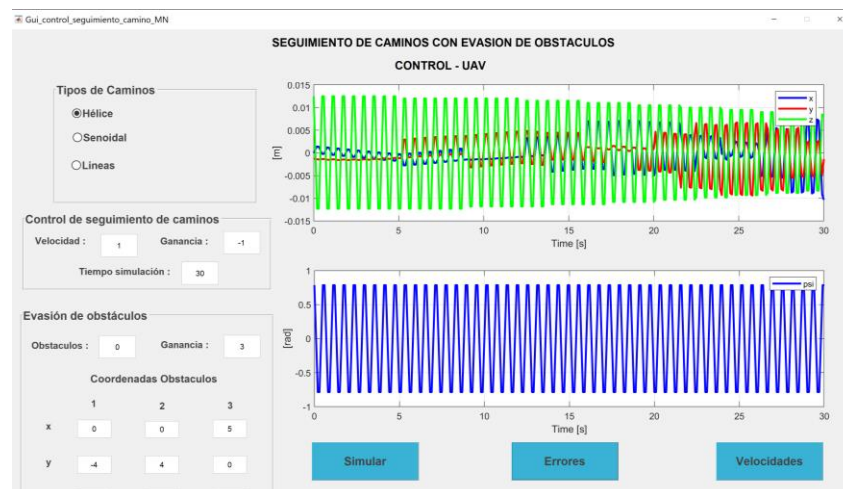
De las simulaciones realizadas para el control de seguimiento de camino: Hélice, mostradas en el Anexo III (Figuras AIII.1 a AIII.13), se obtuvo los valores que se muestran en la Tabla 4.1, en la cual se encuentran la ganancia  $W$ , la distancia euclidiana mínima del punto real del dron al punto más próximo del camino ( $d$ ), el error del ángulo del dron, cruces de las funciones de los errores de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $\varphi$ , y máximos y mínimos de la función del error.

La distancia ( $d$ ) y el error de ángulos se utilizan para constatar el error mínimo que se presenta en el tiempo de simulación, mientras que el cruce por cero y los máximos y mínimos se utilizan para verificar la oscilación que tienen los errores en la simulación.

**Tabla 4.1.** Resultados de la simulación del control de seguimiento de camino: Hélice

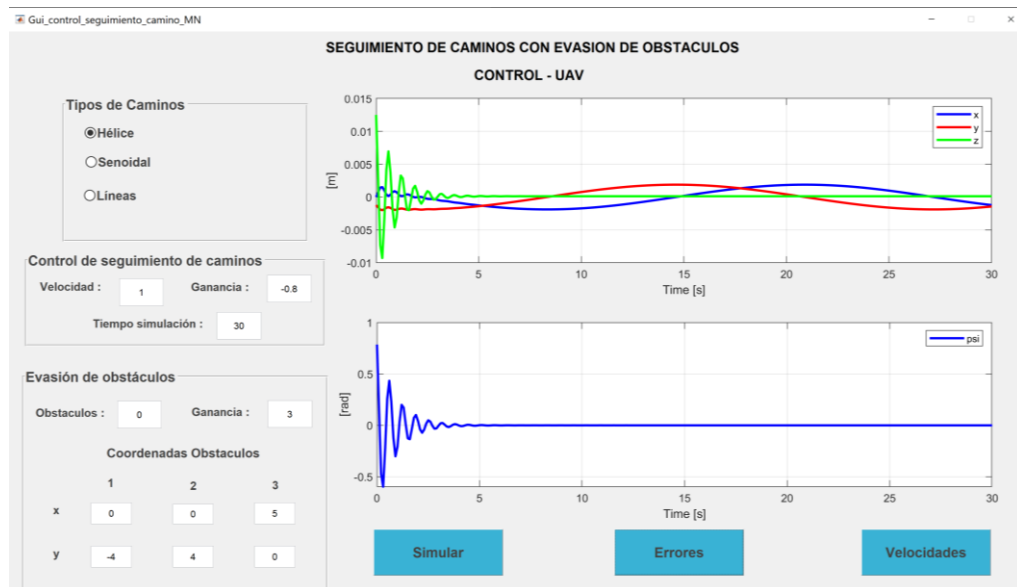
W	Distancia (d)	Error de ángulo	Cruces por cero (CpC)				Máximos y mínimos (MyM)			
			x	y	z	$\varphi$	x	y	z	$\varphi$
-1.1	1.81e-03	7.85e-02	115	109	170	103	102	99	100	102
-1	1.13e-03	2.22e-16	86	78	100	100	84	83	100	99
-0.9	1.66e-03	4.26e-09	10	2	30	97	18	9	62	96
-0.8	1.88e-03	0	6	2	14	94	7	7	53	93
-0.7	2.15e-03	0	4	2	8	111	5	6	54	83
-0.6	2.52e-03	0	4	2	4	195	4	5	48	40
-0.5	3.02e-03	0	4	2	2	220	3	4	51	26
-0.4	3.22e-03	0	44	39	147	238	73	73	75	16
-0.3	4.21e-03	0	34	28	147	7	73	72	74	8
-0.2	6.07e-03	1.11e-16	20	18	143	0	73	72	72	0
-0.1	9.47e-03	3.33e-16	10	6	7	0	74	72	69	0
0	1.26e-02	7.85e-01	2	2	1	0	13	30	30	8
0.1	1.26e-02	7.85e-01	0	1	0	0	2	1	0	0

En la Tabla 4.1 se puede observar que la distancia menor es  $1.13e-03$ , con un valor de ganancia  $W = -1$ , pero se encuentran cruces por cero  $x = 86, y = 78, z = 100$  y  $\varphi = 100$ . Esto indica que existen oscilaciones del control de seguimiento, por lo que el método se vuelve inestable. Además, al comparar los cruces por cero con los máximos y mínimos se observan valores semejantes, lo que quiere decir que las oscilaciones del dron son alrededor del camino que está siguiendo, esto como se puede observar en la Figura 4.21.

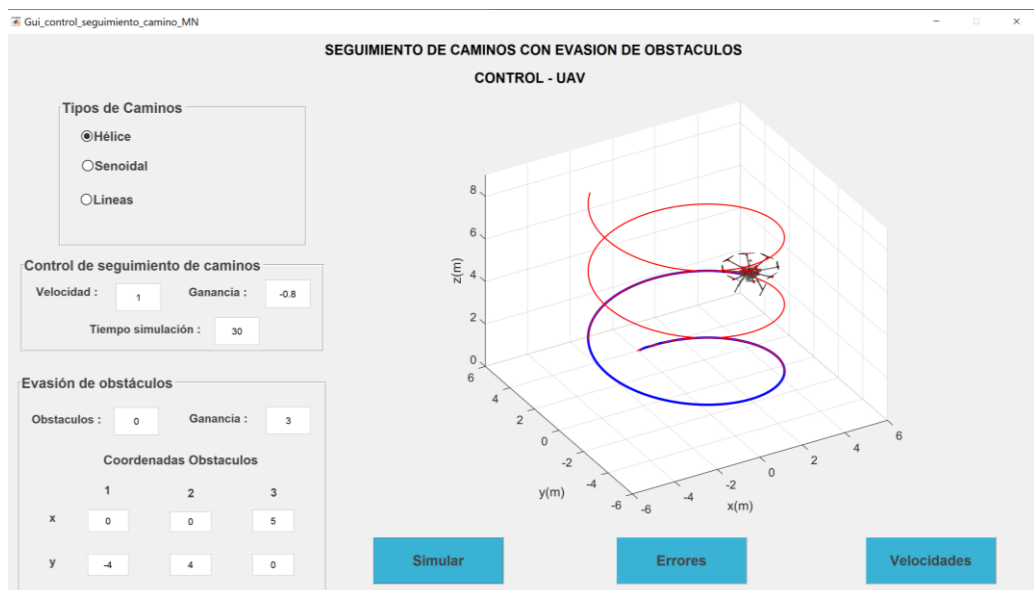
**Figura 4.21.** Gráfica de los errores para  $x, y, z$  y  $\varphi$ , con  $W = -1$ .



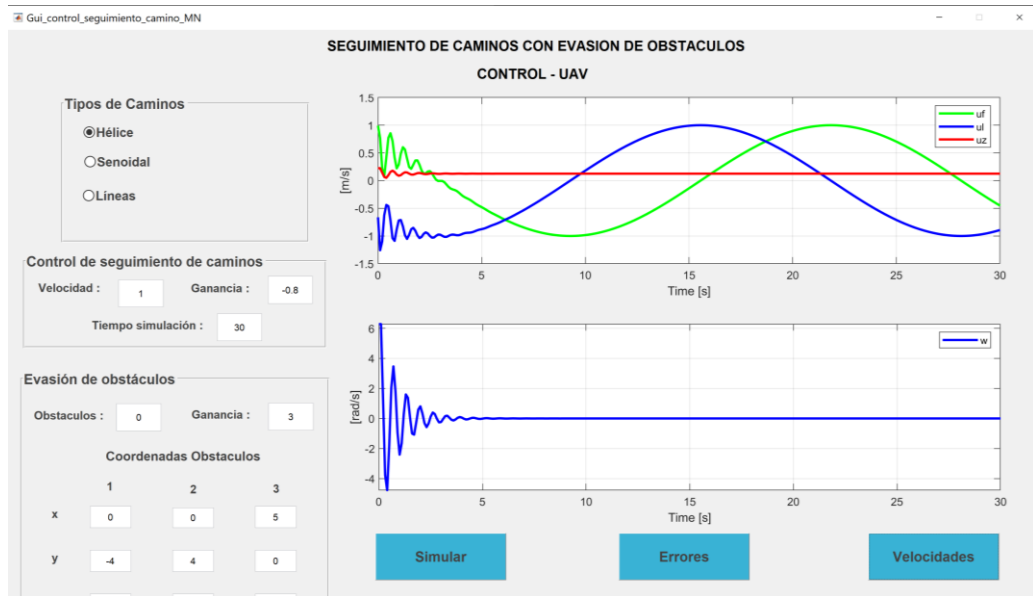
A pesar de que con  $W = -1$  se obtiene el error más bajo, como se observa en la Figura 4.21, el sistema no es estable por lo que, para identificar cual el mejor valor de  $W$ , es necesario buscar el menor error con la menor oscilación. En la Tabla 4.1 se obtiene un error de  $1.88e-03$  con CpC y MyM para  $x$  e  $y$  menores a 10, con  $W = -0.8$ . Además, en la Figura 4.22 se observa que los errores no tienen excesivas oscilaciones. También en la Figura 4.23 y la Figura 4.24 se puede visualizar que el control de seguimiento se realiza de manera correcta y la variación de las velocidades en función del tiempo.



**Figura 4.22.** Gráfica de los errores para  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $\varphi$ , con  $W = -0.8$ .



**Figura 4.23.** Simulación del seguimiento de camino del dron, con  $W = -0.8$



**Figura 4.24.** Velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $\varphi$  de la simulación, con  $W = -0.8$

En la Tabla 4.2 se puede encontrar el promedio de los errores desde un tiempo de 5 s, hasta 5 s menos que se termine la simulación, en la cual se puede ver que los valores más bajos son para  $W = -0.9$  y  $-0.8$ . Esto confirma que el mejor valor de  $W$  es de  $-0.8$  ya que tiene uno de los mejores valores promedios con oscilaciones bajas.

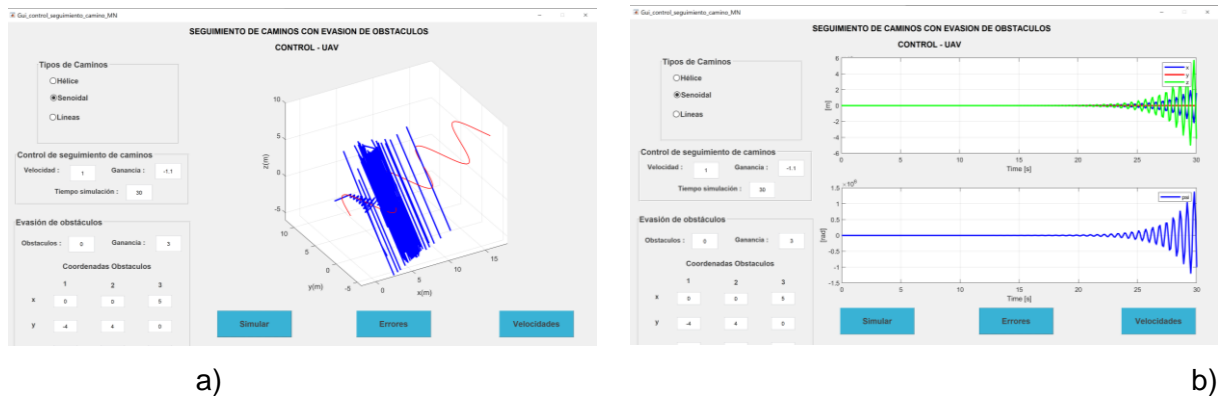
**Tabla 4.2.** Errores promedios de la simulación del camino Hélice

$W$	Error promedio
-1	8.87e-03
-0.9	1.69e-03
-0.8	1.89e-03
-0.7	2.16e-03
-0.6	2.53e-03
-0.5	3.03e-03
-0.4	3.50e-03
-0.3	4.51e-03
-0.2	6.61e-03
-0.1	1.28e-02
0	1.88e-01

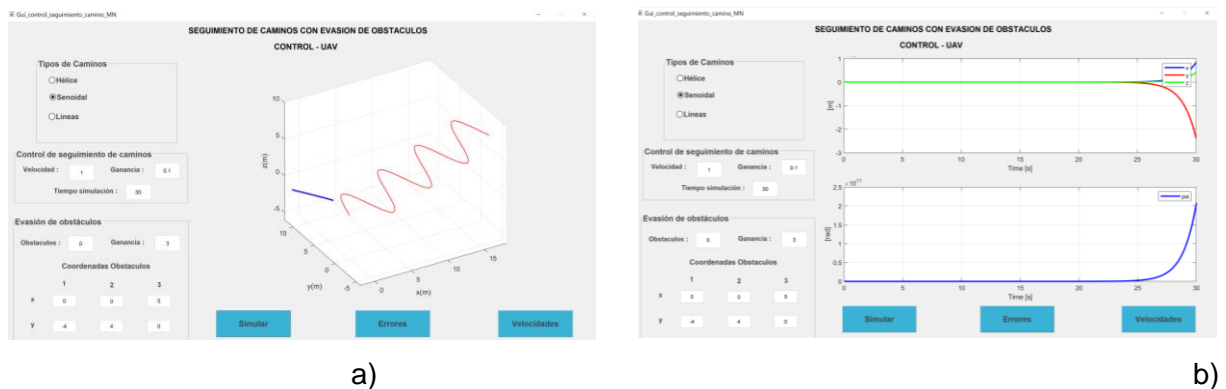
Con base en los datos mostrados en la Tabla 4.1, lo observado en las Figuras 4.22 a 4.24 y lo analizado en los párrafos anteriores, se puede concluir que el mejor valor de  $W$  de los analizados es  $-0.8$ , para el control de seguimiento de camino: Hélice.

### Control de seguimiento de camino: Senoidal

De manera similar que en el camino Hélice, en el Senoidal se comprueba el sistema de control para valores de  $W = -1.1$  y  $W = 0.1$ , con lo que se obtiene las respuestas mostradas en la Figura 4.25 y la Figura 4.26, las otras respuestas del sistema se pueden visualizar en el Anexo IV, de la Figura AIV.1 hasta la Figura AIV.12.



**Figura 4.25.** Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de -1.1 a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W.



**Figura 4.26.** Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de 0.1 a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W.

En la Figura 4.25 se puede observar que para un valor de  $W = -1.1$ , el dron oscila alrededor del camino sin poder seguir el mismo de manera correcta, mientras que, en la Figura 4.26, con un valor de  $W = 0.1$ , se puede ver que la UAV no puede seguir el camino, alejándose del mismo.

**Tabla 4.3.** Resultados de la simulación del control de seguimiento de camino: Hélice

W	Distancia (d)	Error de ángulo	Cruces por cero (CpC)				Máximos y mínimos (MyM)			
			x	y	z	$\varphi$	x	y	z	$\varphi$
-1.1	4.16e-02	7.85e-02	114	89	107	103	102	101	102	102
-1	1.60e-03	2.22e-16	99	95	100	100	99	97	100	99
-0.9	5.57e-05	4.25e-09	88	104	88	97	91	90	92	96
-0.8	1.23e-04	2.22e-16	83	119	83	93	91	94	91	93
-0.7	3.56e-05	0	96	129	96	91	92	94	91	92
-0.6	1.47e-05	0	99	131	99	195	87	94	87	40
-0.5	5.62e-05	0	78	141	78	220	86	95	86	26
-0.4	6.18e-05	0	61	138	59	18	84	87	84	17
-0.3	1.39e-04	0	54	119	54	7	77	85	77	8
-0.2	1.36e-04	1.11e-16	29	102	29	0	67	79	67	0
-0.1	1.81e-04	4.44e-16	13	65	13	0	49	73	49	0
0	9.51e-01	7.85e-01	5	0	5	0	33	30	33	13
0.1	9.51e-01	7.85e-01	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Tabla 4.3 se puede observar que los errores más bajos se obtienen con  $W = -0.9, -0.7, -0.6, -0.5$  y  $-0.4$ , de todos ellos el menor error es  $5.57e-05$  con  $W = -0.6$  y presenta el menor número de CpC y MyM, por lo que se puede decir que la mejor respuesta del sistema de control se da con  $W = -0.6$ . Además, en la Tabla 4.4 se puede observar que la mejor respuesta en promedio de los errores es con  $W = -0.6$ , por lo que, según lo mostrado en las Tablas, la mejor respuesta se da con  $W = -0.6$ .

**Tabla 4.4.** Errores promedios de la simulación del camino Hélice

W	Error promedio
-1	3.24e-02
-0.9	5.65e-03
-0.8	3.87e-03
-0.7	3.49e-03
-0.6	3.46e-03
-0.5	3.65e-03
-0.4	4.23e-03
-0.3	5.37e-03
-0.2	7.63e-03
-0.1	1.44e-02
0	1.14e+00

En la Figura 4.27, Figura 4.28 y la Figura 4.29 se puede observar la respuesta de la simulación del control de seguimiento de camino: Senoidal, utilizando un valor de ganancia  $W = -0.6$ .

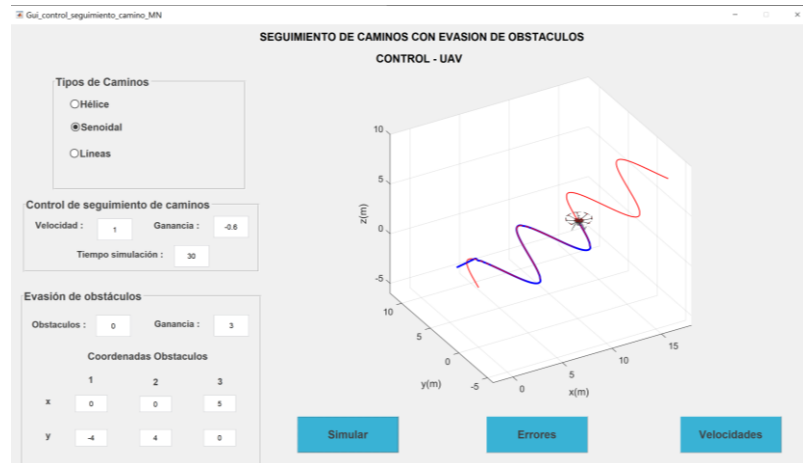


Figura 4.27. Simulación del seguimiento de camino del dron, con  $W = -0.6$ .

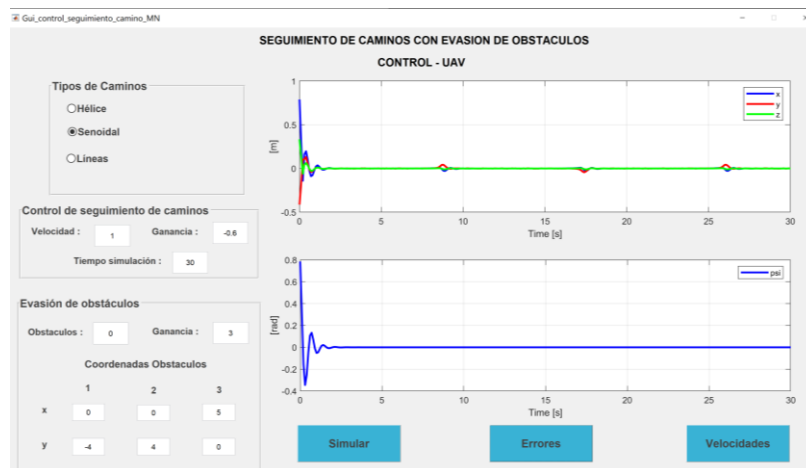


Figura 4.28. Gráfica de los errores para  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $\phi$ , con  $W = -0.6$ .

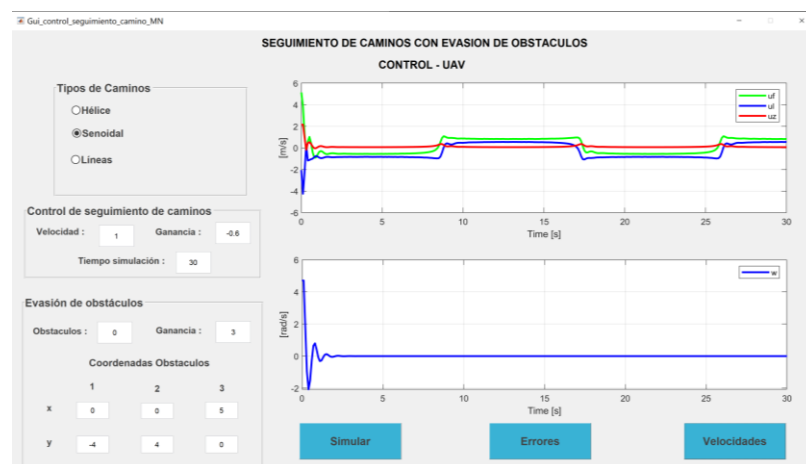
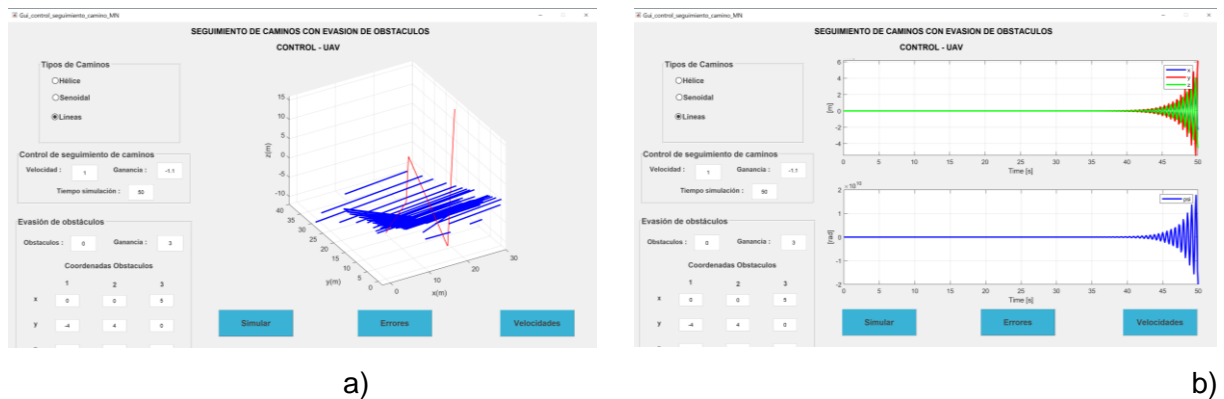


Figura 4.29. Velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $\phi$  de la simulación, con  $W = -0.6$

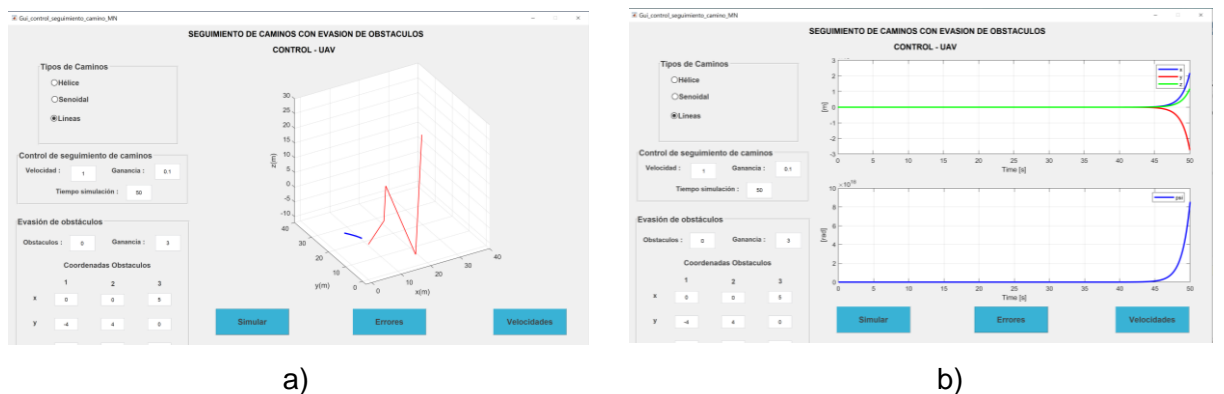
Con base en los datos obtenidos de la simulación, mostrados en las Tablas 4.3 y 4.4, sumado a lo que se observa en las Figuras 4.27 a 4.29, se puede concluir que el mejor valor de  $W$  para el control de seguimiento de camino senoidal es de  $-0.6$ .

### Control de seguimiento de camino: Líneas

Siguiendo con el procedimiento, se simula el sistema de control con  $W = -1.1$  y  $0.1$ , para el seguimiento de camino Líneas, por lo que se obtiene las respuestas mostradas en la Figura 4.30 y Figura 4.31, mientras que, todos los resultados se muestran en el Anexo V.



**Figura 4.30.** Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de  $-1.1$  a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W.



**Figura 4.31.** Simulación del seguimiento de camino: Senoidal, con una ganancia de  $0.1$  a) camino seguido por el dron y b) error producidos en la simulación en los ejes x, y, z e W.

En la Figura 4.30 se puede observar que con un valor de  $W = -1.1$  la UAV oscila sin poder seguir el camino de manera correcta, mientras que, en la Figura 4.31, con un valor de  $W = 0.1$ , se puede ver que la UAV no sigue el camino y se dirige en sentido opuesto.

**Tabla 4.5.** Resultados de la simulación del control de seguimiento de camino: Líneas

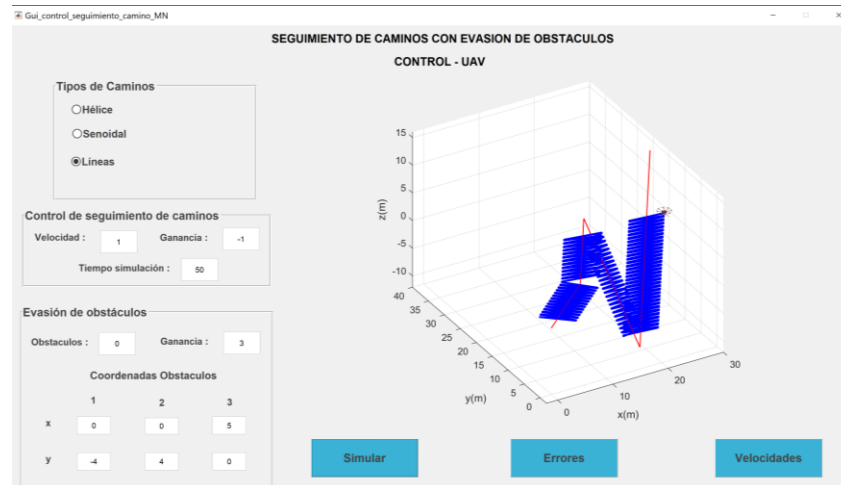
W	Distancia (d)	Error de ángulo	Cruces por cero (CpC)				Máximos y mínimos (MyM)			
			x	y	z	$\varphi$	x	y	z	$\varphi$
-1.1	3.45e-01	7.85e-02	103	103	103	103	102	102	102	102
-1	7.24e-03	0	100	100	100	98	99	100	99	100
-0.9	4.17e-03	4.26e-09	101	92	89	97	80	82	81	96
-0.8	3.29e-03	1.11e-16	107	108	109	93	79	79	79	93
-0.7	2.88e-03	0	111	112	113	93	77	79	77	92
-0.6	6.71e-04	0	81	86	83	92	88	85	87	91
-0.5	7.31e-05	0	119	118	121	219	73	73	72	26
-0.4	6.62e-04	0	117	118	119	238	68	69	69	16
-0.3	1.19e-04	0	117	118	121	247	64	64	65	8
-0.2	1.83e-03	1.11e-16	117	118	119	0	63	62	62	0
-0.1	8.34e-04	4.44e-16	93	94	101	0	58	56	57	0
0	3.44e+00	7.85e-01	2	0	1	0	70	69	70	17
0.1	3.45e+00	7.85e-01	0	0	0	0	1	2	1	0

En la Tabla 4.5 se puede observar que se obtiene un menor error para  $W = -0.5$  ( $7.31e-05$ ) y errores de  $10^{-4}$  para  $W = -0.6, -0.4, -0.3$  y  $-0.1$ . Por otro lado, en la Tabla 4.6 se puede visualizar que el menor error promedio es  $4.95e-02$  con  $W = -0.8$  y los errores promedios más bajos son de  $10^{-2}$  con  $W = -0.9$  hasta  $W = -0.4$ . Con base en lo mostrado en estas tablas, y al tomar en consideración CpC y la MyM, se concluye que el sistema de control produce errores aceptables con menores oscilaciones para  $W = -0.6$ .

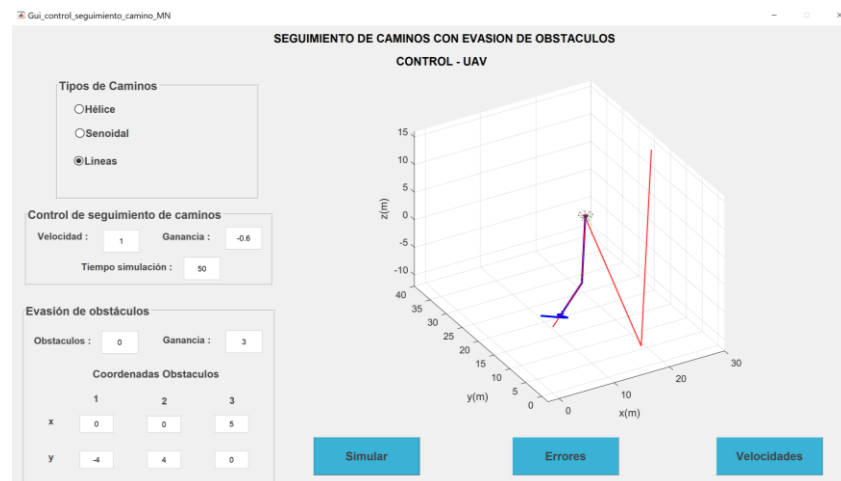
**Tabla 4.6.** Errores promedios de la simulación del camino Líneas

W	Error promedio
-1	2.22e+00
-0.9	5.72e-02
-0.8	4.96e-02
-0.7	5.09e-02
-0.6	5.38e-02
-0.5	6.76e-02
-0.4	8.21e-02
-0.3	1.06e-01
-0.2	1.49e-01
-0.1	2.69e-01
0	3.94e+00

En la Figura 4.32 se puede ver el seguimiento de camino Líneas con un valor de  $W = -0.6$ , mientras que en la Figura 4.33 se puede observar el resultado de la simulación con  $W = -1$ .



**Figura 4.32.** Simulación del seguimiento de camino del dron, con  $W = -1$

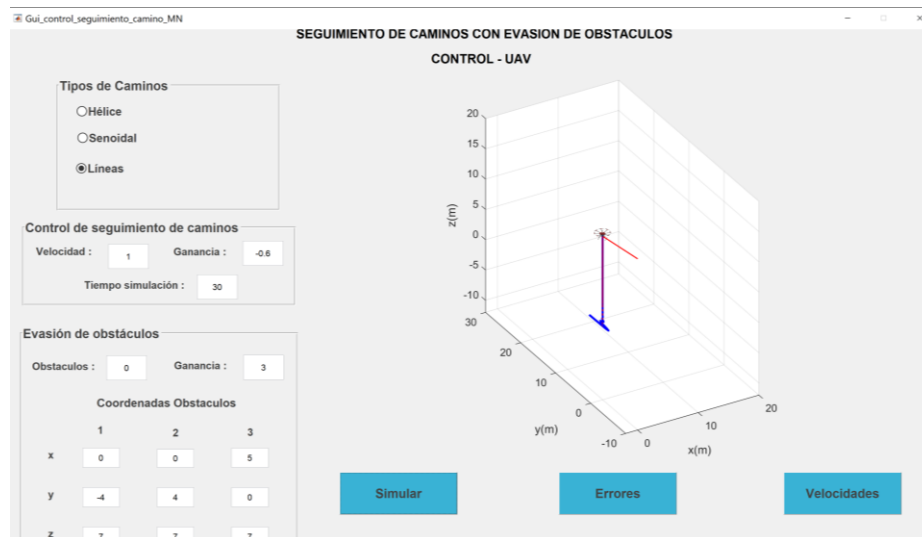


**Figura 4.33.** Simulación del seguimiento de camino del dron, con  $W = -0.6$

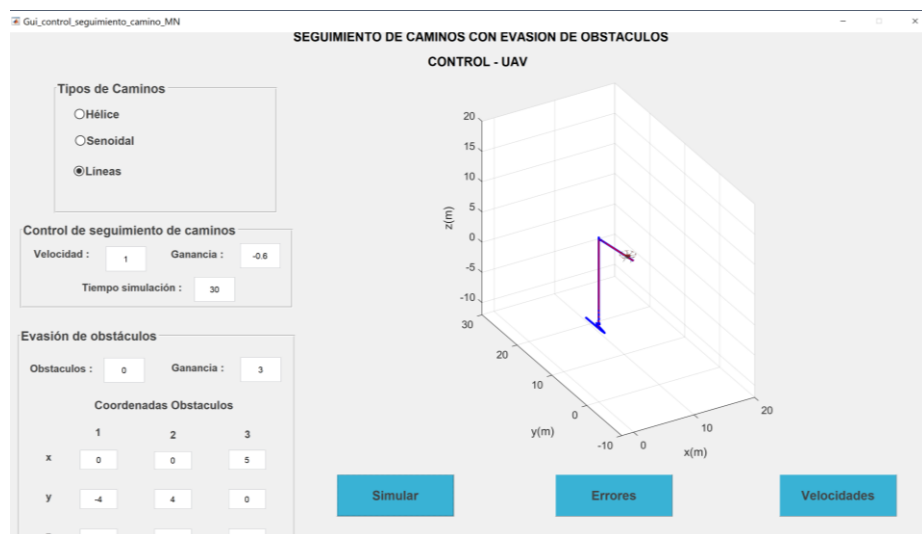
Al comparar las Figuras 4.32 y 4.33, se puede observar que con  $W = -1$  existen oscilaciones por todo el camino, pero logra completar una mayor parte de la trayectoria que al emplear la simulación realizada con  $W = -0.6$ . Esto quiere decir que, a pesar de presentar los mejores resultados con  $W = -0.6$ , en realidad el control de seguimiento de caminos no está siendo efectivo para completar la trayectoria, como se muestra en la Figura 4.33.

El control de seguimiento de caminos a cumplido de manera satisfactorio su funcionamiento para los recorridos Hélice y Senoidal, pero no ha podido funcionar de manera adecuada en las Líneas, tal como se puede observar en las Figuras 4.33 y 4.34. Sin embargo, en la Figura 4.35 se visualiza que funciona correctamente.





**Figura 4.34.** Simulación del seguimiento de camino del dron, con  $W = -0.6$ , y un ángulo entre líneas de 262.72



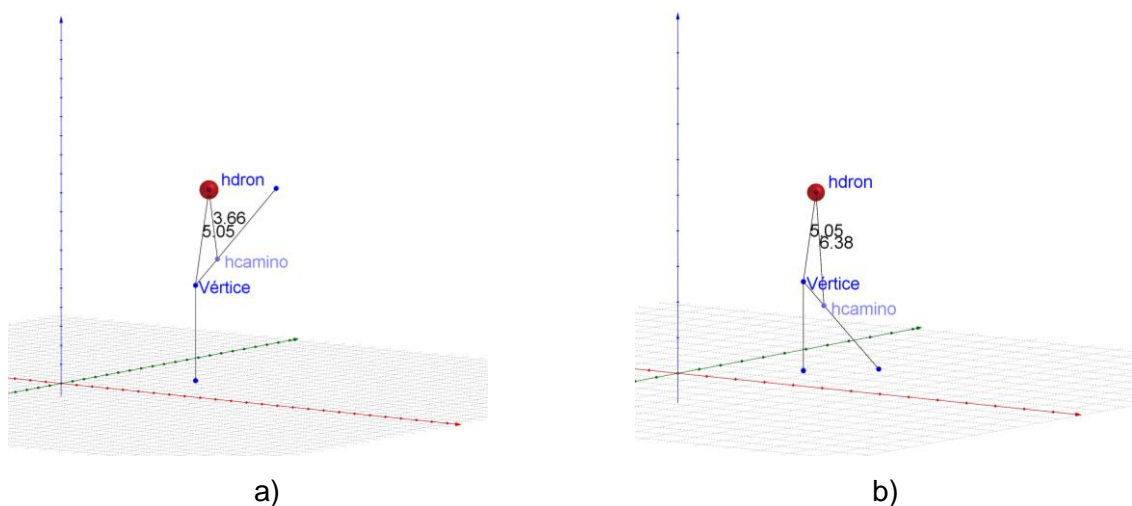
**Figura 4.35.** Simulación del seguimiento de camino del dron, con  $W = -0.6$ , y un ángulo entre líneas de 262.34

De las Figuras 4.34 y 4.35 se puede deducir que el control de seguimiento funciona hasta un ángulo específico. Además, en las Figuras AVI.1 a AVI.10, se observa que el ángulo varía según el valor de ganancia  $W$ , como se puede verificar en la Tabla 4.7, la cual indica los valores de los ángulos para cada  $W$  en los cuales el control de seguimiento de caminos funciona correctamente.

**Tabla 4.7.** Ángulos en los que el sistema de control de seguimiento funciona, en función de la ganancia  $W$ .

$W$	Angulo máximo en el que funciona el control de seguimiento	Variación en el eje z
-1	Cumple para ángulos mayores a 270	
-0.9	260.79	2.4
-0.8	261.18	2.3
-0.7	261.57	2.2
-0.6	262.34	2
-0.5	262.72	1.9
-0.4	263.88	1.6
-0.3	265.03	1.3
-0.2	266.56	0.9
-0.1	268.09	0.5
0	267.33	0.7

Al realizar un análisis más profundo de lo obtenido en la Tabla 4.7, se observa que el control de seguimiento de caminos: Líneas, no es efectivo para ángulos mayores a 270 entre las rectas. Esto se debe a que la comparación para calcular el camino que tiene que seguir el dron se hace entre el punto real del dron y el punto del camino más cercano, en el caso de la Figura 4.36 a) se puede observar que este punto más cercano forma parte del otro segmento, mientras que, en la Figura 4.36 b) este punto más cercano es el mismo vértice, por lo que el dron se trunca en un laso de acercarse y alejarse del vértice.



**Figura 4.36.** Comparativa entre caminos a) ángulo entre líneas menor que 270 y b) ángulo entre rectas mayor que 270

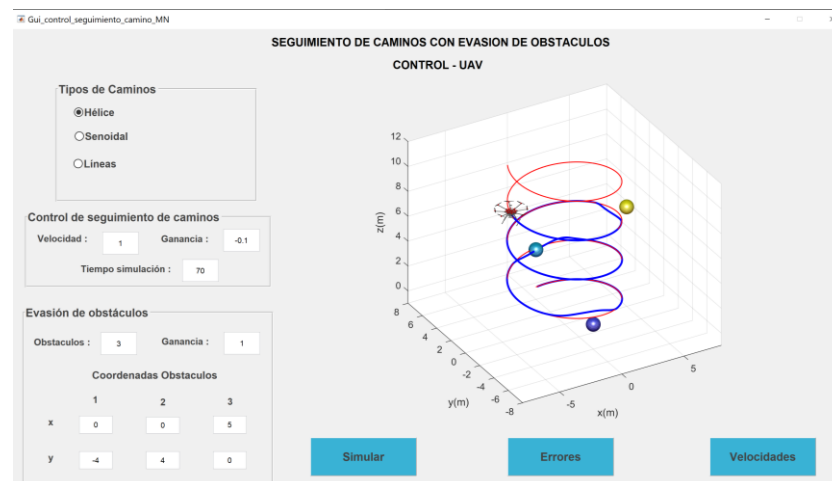
Como se mencionó en el párrafo anterior, y como se observa en la Figura 4.36 en la a), existe una menor distancia entre la hdrón y la hcamino, mientras que en la b) la menor distancia es la que existe entre hdrón y el vértice. Por este motivo el control de seguimiento no logra superar los caminos que tengan ángulos superiores a 270 grados.

Con base en los datos obtenidos en las simulaciones, se concluye que el valor de  $W$  en el que el control se comporta de mejor manera es de  $-0.6$  y que el control de seguimiento de caminos funciona correctamente hasta un ángulo específico entre las líneas, el mismo que varía según cambia el valor de  $W$ .

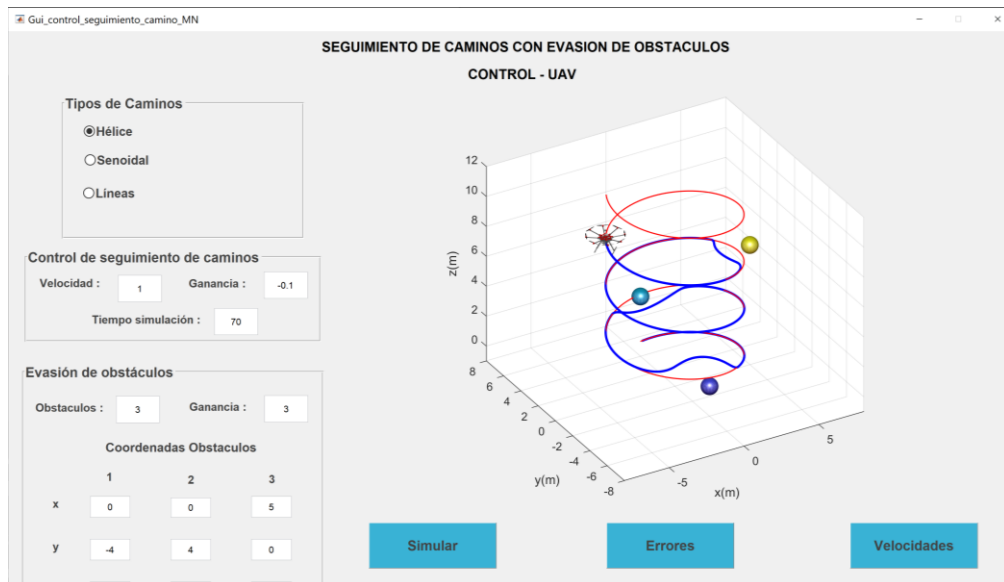
### 4.3.2 Sistema de evasión de obstáculos

Como se observó en el apartado anterior de control de seguimiento de caminos: Líneas, este método no siempre funciona de manera correcta, por lo que en este subcapítulo se verificara el funcionamiento del control con diferentes valores de distancia de seguridad de obstáculos y de ganancia  $W$ .

En la Figura 4.38 se puede observar la simulación realizada de caminos Hélice considerando un valor de  $W = -0.1$  y una ganancia de 1, mientras que en la Figura 4.39 se observa el mismo experimento con un valor de ganancia de 3. Además, se consideran 3 obstáculos en los puntos  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (5, 0, 7)$ , y un tiempo de simulación de 70 s.

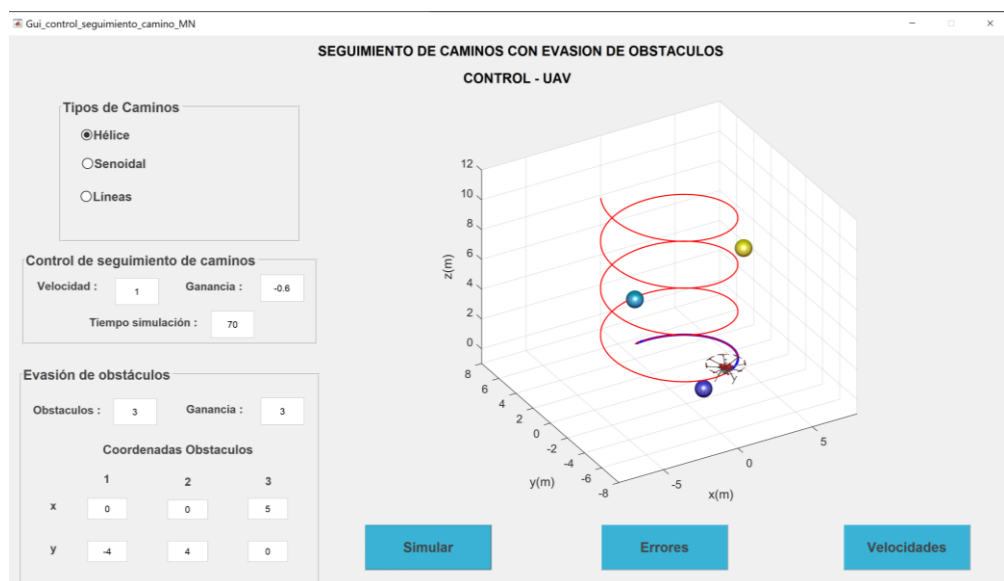


**Figura 4.37.** Simulación del camino Hélice con  $W = -0.1$ , con ganancia de 1 y 3 obstáculos



**Figura 4.38.** Simulación del camino Hélice con  $W = -0.1$ , con ganancia de 3 y 3 obstáculos

Como se observa en las Figuras 4.37 y 4.38, con el valor de ganancia de 1, el dron no puede evadir los objetos, mientras que, con una ganancia de 3 el dron puede evadir los obstáculos sin problema alguno. Se concluye por tanto que, con un valor de ganancia de 3, la UAV puede evadir los obstáculos sin que exista una colisión, pero como se observa en la Figura 4.39, si se realiza el experimento con  $W = -0.6$  el dron no puede superar al primer obstáculo.



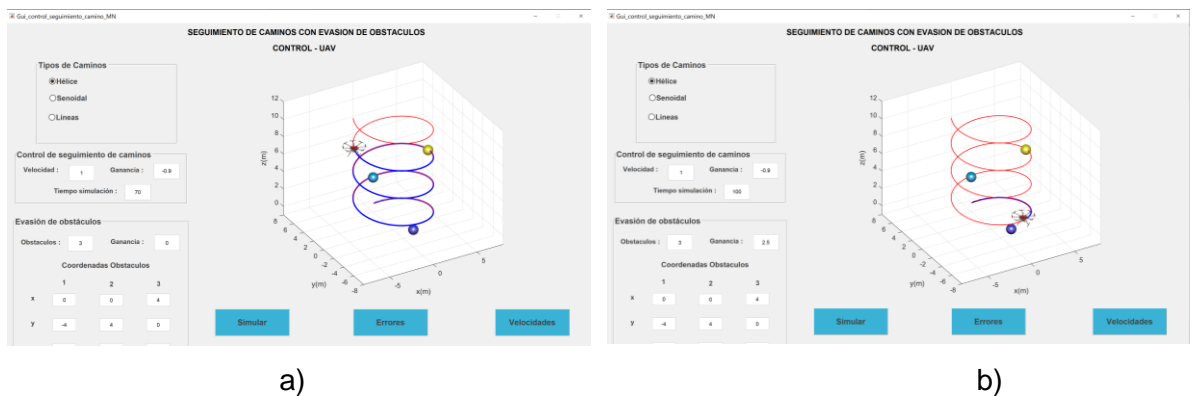
**Figura 4.39.** Simulación del camino Hélice con  $W = -0.1$ , con ganancia de 3 y 3 obstáculos

En los siguientes subtemas se analizará a mayor detalle la respuesta del control de seguimiento de caminos con evasión de obstáculos, para los recorridos Hélice, Senoidal y Líneas.

#### 4.3.2.1 Evasión de obstáculos del camino Hélice

Como se observó en las anteriores Figuras, el dron logra completar los caminos evadiendo los obstáculos solo para ciertos valores de  $W$  y de ganancia, lo que conlleva a realizar un análisis más exhaustivo del comportamiento del control de seguimiento de camino.

Al realizar las simulaciones para los diferentes valores de  $W$ , variando la Ganancia desde cero hasta llegar a un valor donde el dron no puede seguir el camino, como se muestra en la Figura 4.40 a) y la Figura 4.39 b) respectivamente, se obtuvieron las Figuras del Anexo VII y las Tablas del Anexo XI.



**Figura 4.40.** Respuesta del sistema de control de seguimiento de camino: Hélice con 3 obstáculos,  $W = -0.9$  a) con *Ganancia* = 0 y b) *Ganancia* = 2.5

De la Figura 4.40 se puede concluir que, a pesar de que el dron completa el camino, no logra esquivar los obstáculos debido a que se presentan colisiones con los 3 objetos. Esto se observa en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.9$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.9	0	SI	21	24	24	3
-0.9	1	SI	22	26	26	3
-0.9	2	SI	26	36	37	3
-0.9	2.1	SI	27	39	39	3
-0.9	2.2	NO	27	0	0	1
-0.9	2.3	NO	28	0	0	1
-0.9	2.4	NO	29	0	0	1
-0.9	2.5	NO	0	0	0	0

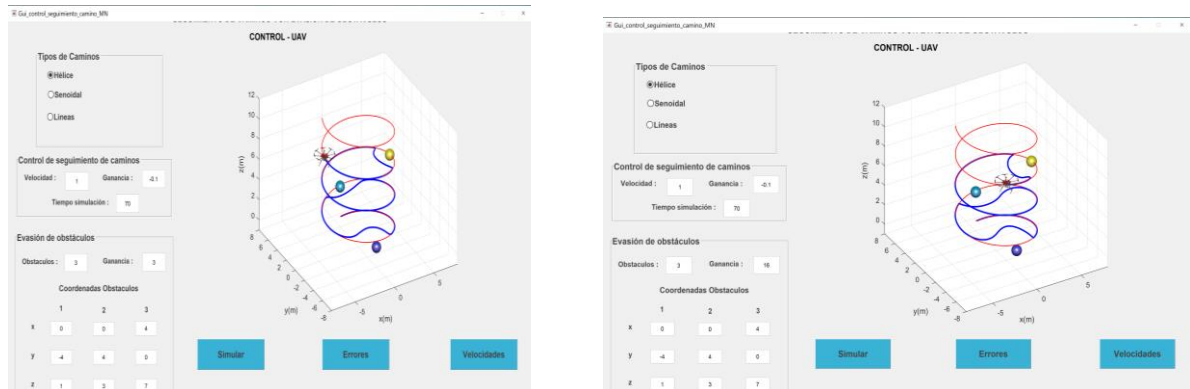
En la Tabla 4.8 se puede visualizar que, para el valor de  $W = -0.9$  con  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.1$ , el dron puede seguir el camino pero colisiona con los 3 objetos, mientras que, para  $2.2 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$ , la UAV no puede completar el camino ya que no esquiva las esferas. Al observar las Tablas del Anexo XI y las Figuras del Anexo VII, se verifica que este es un problema recurrente para todos los valores de  $W$ , pero mejora mientras que  $W$  crece.

Al comparar todas las Tablas del Anexo XI, se obtiene que el único valor de  $W$  con el que el dron puede completar el camino y evitar todos los obstáculos es de  $-0.1$ , esto como se puede ver en la Tabla 4.9, la cual tiene el número de colisiones con cada objeto y el número de esferas superadas.

**Tabla 4.9.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 16$  y  $W = -0.1$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	0	SI	21	24	24	3
-0.1	1	SI	15	22	23	3
-0.1	2	SI	0	10	10	3
-0.1	3	SI	0	0	0	3
-0.1	4	SI	0	0	0	3
-0.1	5	SI	0	0	0	3
-0.1	6	SI	0	0	0	3
-0.1	16	SI	0	0	0	3

Tomando en consideración la Tabla 4.9, se puede observar que la UAV comienza a superar todos los obstáculos cuando la Ganancia  $\geq 3$ . Esto se puede corroborar en la Figura 4.41 donde a) es la simulación con una Ganancia = 3 y en b) se observa el dron con Ganancia = 16.



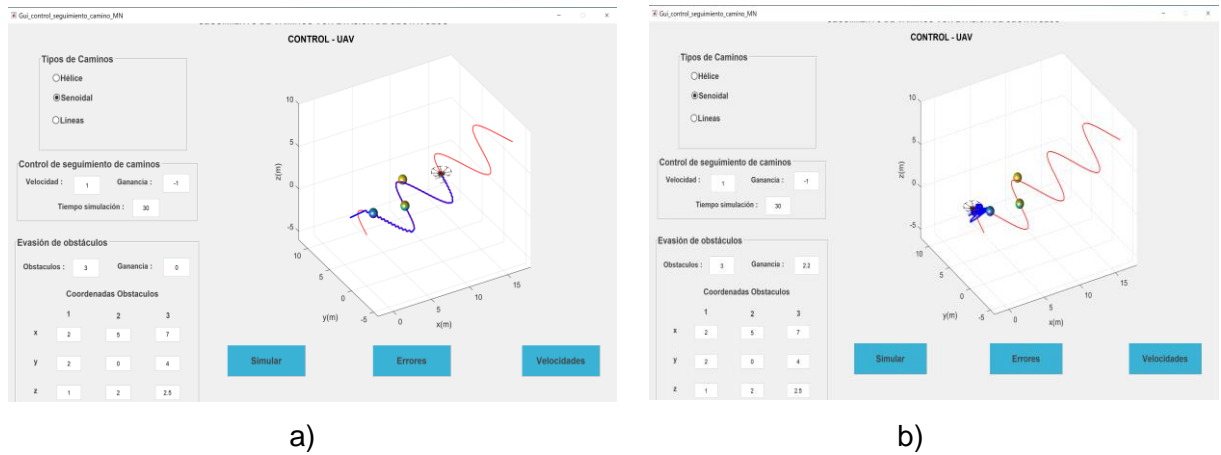
**Figura 4.41.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$ ,  $P_3 = (4, 0, 7)$  y  $W = -0.1$  a) Ganancia = 3, y b) Ganancia = 16.

De la Figura 4.41 se observa que efectivamente la UAV supera los 3 obstáculos para Ganancia  $\geq 3$ . Además, conforme se incrementa la Ganancia se aumenta la repulsión del robot hacia el objeto, por lo que es mayor la distancia de seguridad entre ellos. Esto podría afectar en el caso de que existan dos obstáculos cercanos, ya que el dron no podría pasar entre ellos debido a la distancia de seguridad generada por los dos objetos.

Con base en los datos obtenidos, mostrados en el Anexos XI y las Figuras del Anexo VII, se puede concluir que efectivamente el sistema de control con evasión de obstáculos puede seguir el camino programado sin colisiones, pero solo para el valor de  $W = -0.1$  y Ganancia  $\geq 3$ .

#### 4.3.2.2 Evasión de obstáculos del camino Senoidal

Al realizar las simulaciones para los diferentes valores de  $W$ , variando la Ganancia desde cero hasta llegar a un valor con el cual el dron no puede seguir el camino (como se muestra en las Figuras 4.42 a) y 4.42 b), respectivamente), se obtuvieron las Figuras del Anexo VIII y las Tablas del Anexo XII.



**Figura 4.42.** Respuesta del sistema de control de seguimiento de camino: Senoidal con 3 obstáculos,  $W = -1$  a) con  $Ganancia = 0$  y b)  $Ganancia = 2.2$

En la Figura 4.40 del capítulo anterior, se observaba que la UAV puede completar el camino, pero se presentan colisiones. Algo similar se presenta en el camino Senoidal (Figura 4.42), lo cual se puede verificar en la Tabla 4.10 que muestra las colisiones de la UAV con las esferas para  $W = -1$  y  $0 \leq Ganancia \leq 2.2$ .

**Tabla 4.10.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq Ganancia \leq 2.2$  y  $W = -1$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-1	0	SI	23	24	7	3
-1	2	SI	31	18	0	3
-1	2.1	SI	31	22	0	3
-1	2.2	NO	20	0	0	0

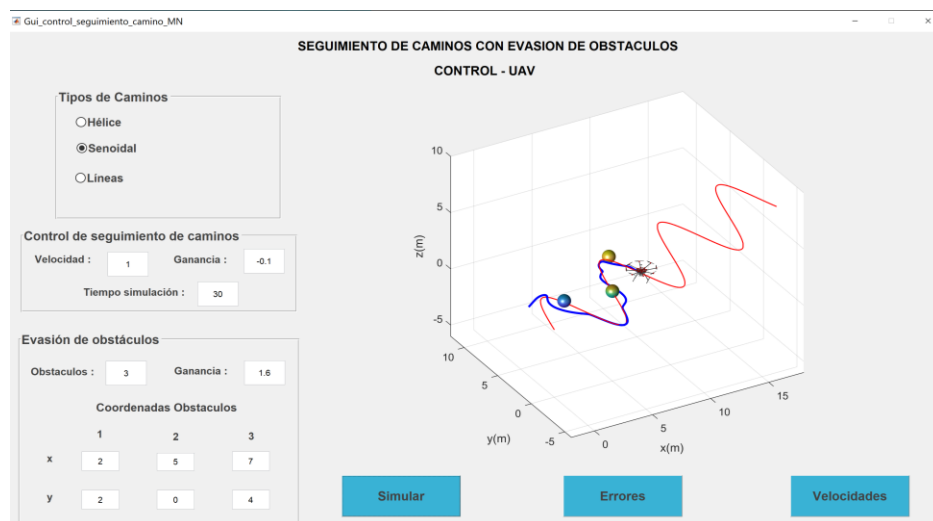
En la Tabla 4.10 se verifica que el dron puede seguir el camino con un valor de  $W = -1$  y una  $Ganancia = 0$ , pero colisiona con los 3 objetos. Por otro lado, para  $2 \leq Ganancia \leq 2.2$ , la UAV no puede completar el camino ya que no esquiva las esferas. Al observar las Tablas del Anexo XII y las Figuras del Anexo VIII, se observa que este es un problema recurrente para todos los valores de  $W$  y a pesar de que este mejora mientras  $W$  crece, en las simulaciones realizadas no se pudo encontrar un valor de  $W$  con el cual el dron logre completar el camino y evite los obstáculos.



Al comparar todas las Tablas del Anexo XII, se observa que el número de colisiones disminuye para valores de  $W = -0.2$  y  $-0.1$ , pero la UAV no puede completar el camino sin chocarse con los obstáculos, lo cual se puede verificar en la Tabla 4.11 y en la Figura 4.43.

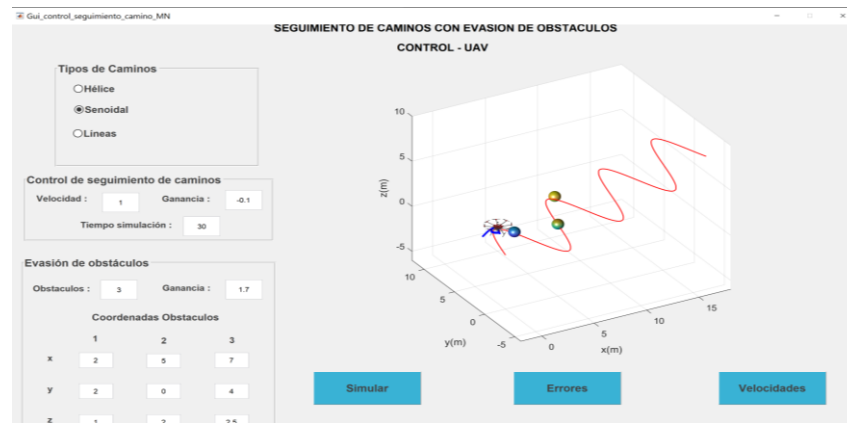
**Tabla 4.11.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 1.7$  y  $W = -0.1$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	0	SI	24	24	22	3
-0.1	1	SI	24	21	24	3
-0.1	1.2	SI	23	20	25	3
-0.1	1.4	SI	21	18	29	3
-0.1	1.6	SI	18	15	34	3
-0.1	1.7	SI	0	0	0	0



**Figura 4.43.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$ ,  $P_3 = (4, 0, 7)$  y  $W = -0.1$  con  $\text{Ganancia} = 1.6$ .

En la Figura 4.43 se observa que efectivamente la UAV completa el camino e intenta esquivar los obstáculos; sin embargo, la distancia de seguridad no es suficiente para evitar los obstáculos (no es suficiente para evitar las esferas) y al subir el valor de la  $\text{Ganancia} = 1.7$ , el robot no puede seguir el camino. Esto se presenta en la Figura 4.44.

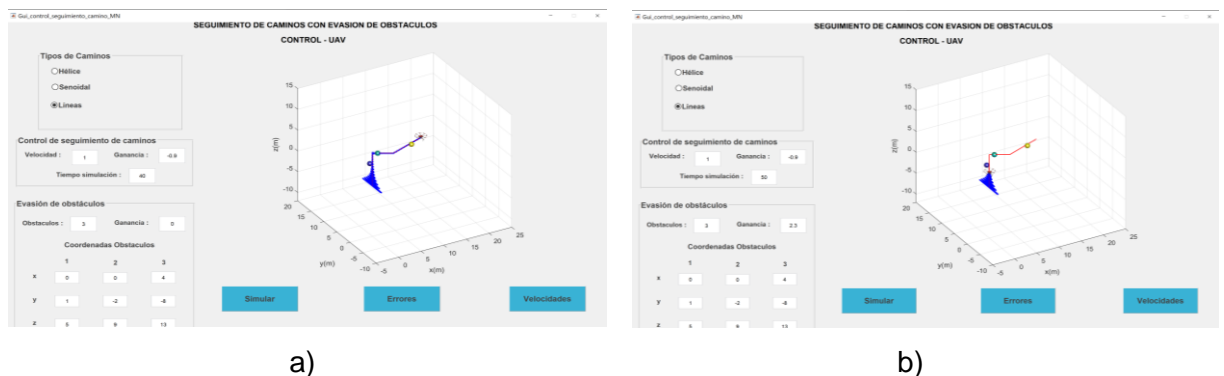


**Figura 4.44.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1.7$ .

Con base en los datos obtenidos, mostrados en el Anexos XII y las Figuras del Anexo VIII, se puede concluir que el control de seguimiento de camino: Senoidal con evasión de obstáculos, no puede seguir el camino y evitar los objetos. Esto puede deberse a la posición de las esferas o la forma del camino.

#### 4.3.2.3 Evasión de obstáculos del camino Líneas

Al realizar las simulaciones para los diferentes valores de  $W$ , variando la Ganancia desde cero hasta llegar a un valor con el cual el dron no puede seguir el camino (como se muestra en las Figuras 4.45 a) y 4.45 b), respectivamente), se obtuvieron las Figuras del Anexo IX y las Tablas del Anexo XIII.



**Figura 4.45.** Respuesta del sistema de control de seguimiento de camino: Senoidal con 3 obstáculos,  $W = -0.9$  a) con  $Ganancia = 0$  y b)  $Ganancia = 2.3$

En los análisis realizados para los caminos Hélice y Senoidal se observó que el dron puede completar el camino, al trabajar con un valor de  $Ganancia = 0$ , pero colisiona con los 3 objetos; el camino Líneas se comporta de forma similar, lo cual se puede verificar en la Tabla 4.12 que muestra los choques de la UAV con las esferas para  $W = -0.9$  y  $0 \leq Ganancia \leq 2.2$ .

**Tabla 4.12.** Número de colisiones del dron con los objetos del caminoSenoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.9$ 

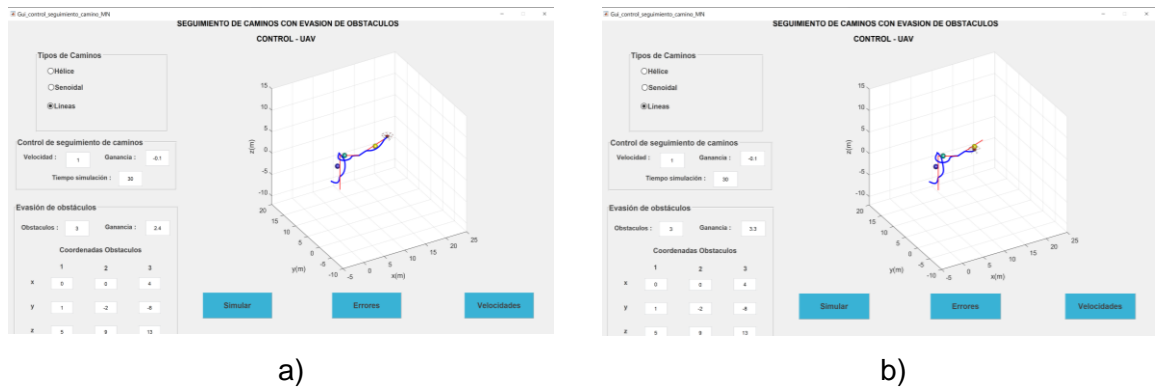
W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.9	0	SI	13	24	24	3
-0.9	1	SI	12	26	24	3
-0.9	2	SI	11	36	29	3
-0.9	2.1	SI	11	39	29	3
-0.9	2.2	SI	12	41	31	3
-0.9	2.3	NO	0	0	0	0

En la Tabla 4.12 se puede verificar que el dron puede seguir el camino, con un valor de  $W = -0.9$  y con  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.2$ , pero colisiona con los 3 objetos. Por otro lado, para  $\text{Ganancia} = 2.3$ , la UAV no puede completar el camino ya que no le es posible esquivar las esferas. Al observar las Tablas del Anexo XIII y las Figuras del Anexo IX se observa que este es un problema recurrente para todos los valores de  $W$  y mejora cuando  $W$  crece.

Al comparar todas las Tablas del Anexo XII, se observa que el número de colisiones disminuye para valores  $W$  mayores y cuando  $W = -0.1$ , el robot logra completar el camino evitando los 3 obstáculos. Esto se puede verificar en los datos de la Tabla 4.13 y en la Figura 4.46.

**Tabla 4.13.** Número de colisiones del dron con los objetos del caminoSenoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 3.4$  y  $W = -0.1$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	0	SI	14	24	23	3
-0.1	1	SI	0	23	20	3
-0.1	2	SI	0	12	8	3
-0.1	2.1	SI	0	10	7	3
-0.1	2.2	SI	0	8	5	3
-0.1	2.3	SI	0	6	2	3
-0.1	2.4	SI	0	0	0	3
-0.1	3	SI	0	0	0	3
-0.1	3.3	SI	0	0	0	3
-0.1	3.4	NO	0	0	0	0



**Figura 4.46.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.1$  a)  $Ganancia = 2.4$  y b)  $Ganancia = 3.3$ .

En las Figuras 4.46 a) y 4.46 b) se observa que la UAV completa el camino y esquiva los obstáculos. Cabe mencionar que la diferencia entre los dos casos es que existe una mayor distancia de seguridad en la Figura 4.46 en la b).

Con base en los datos obtenidos, mostrados en el Anexos XIII y las Figuras del Anexo IX, se puede concluir que el control de seguimiento de camino: Líneas con evasión de obstáculos, cumple con la función de seguir el camino y evita los 3 obstáculos para valores de  $W = -0.1$  y  $2.4 \leq Ganancia \leq 3.3$ .

Una vez completado el análisis del control de seguimiento de caminos con evasión de obstáculos para los caminos Hélice, Senoidal y Líneas, donde se idéntico que la evasión de obstáculos se realiza sin colisiones o se reducen las mismas cuando  $W$  crece, se puede concluir que el mejor resultado se obtiene con  $W = -0.1$  y  $Ganancia \geq 3$ .

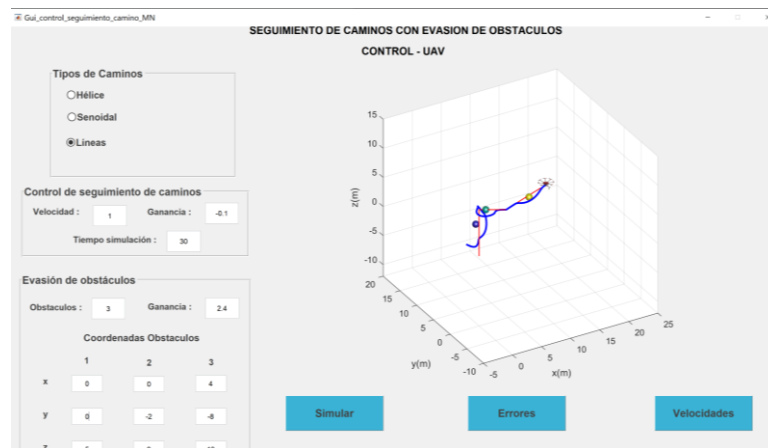
Al tomar en consideración todo lo observado en el desarrollo de este trabajo y al observar las diferentes posiciones de los obstáculos en los 3 caminos, se puede decir que el funcionamiento del control de seguimiento de caminos con obstáculos depende de la forma y la posición del objeto en relación con el camino. En el siguiente capítulo se realizará un análisis del efecto de la posición de la esfera en referencia del camino seguido.

#### 4.3.2.4 Limitaciones de la evasión de obstáculos

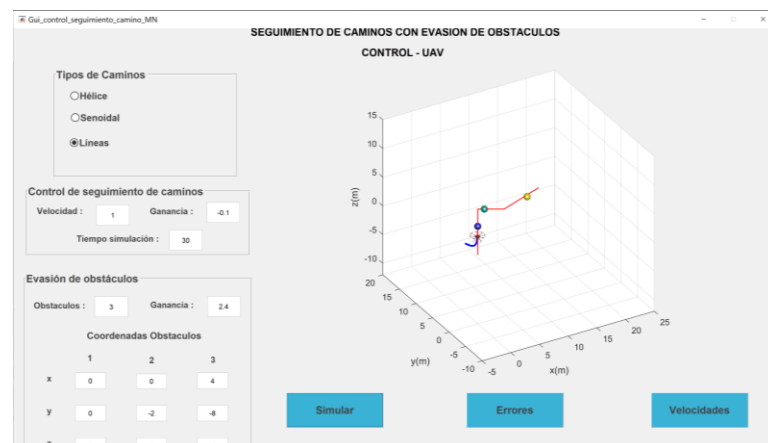
Como se observó en los apartados anteriores, la UAV no siempre puede esquivar los obstáculos. En este apartado se procede a analizar el efecto que tiene la posición del objeto con relación al camino que está siguiendo y si es existe la posibilidad de modificar el comportamiento del dron al cambiar la posición de las esferas.

Como se observó en las Figuras 4.34 y 4.35, el ángulo que se da entre las rectas afecta al funcionamiento del control de seguimiento de camino. Además, como se encontró en el análisis de la evasión de obstáculos, los mejores resultados se dieron para  $W = -0.1$ . Tomando en consideración estos dos puntos, se puede decir que el dron puede superar estos obstáculos siempre y cuando el valor de  $-0.2 \leq W \leq -0.1$  y el objeto no ocasione una desviación de la ruta de la UAV en un ángulo mayor a 265 grados.

En los Anexos X y XIII se presentan los resultados de la simulación realizadas para identificar los efectos que tiene la posición de los objetos al funcionamiento del control de seguimiento de camino. En la Figura 4.47 se puede observar la respuesta del control de seguimiento de camino cuando la esfera se encuentra a un costado del camino, mientras que, en la Figura 4.48. se observa la simulación con los mismos parámetros con el primer obstáculo ubicado en el centro del camino.



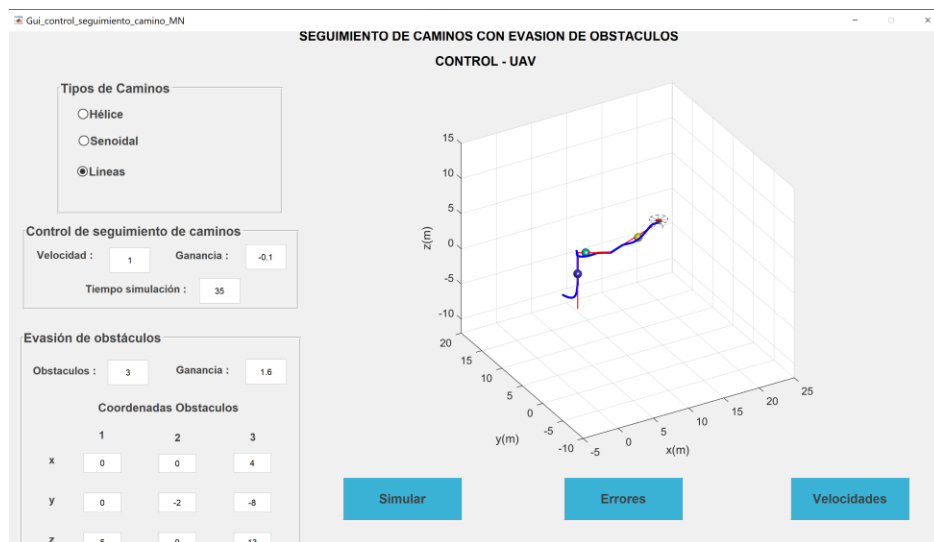
**Figura 4.47.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado a un lado del camino



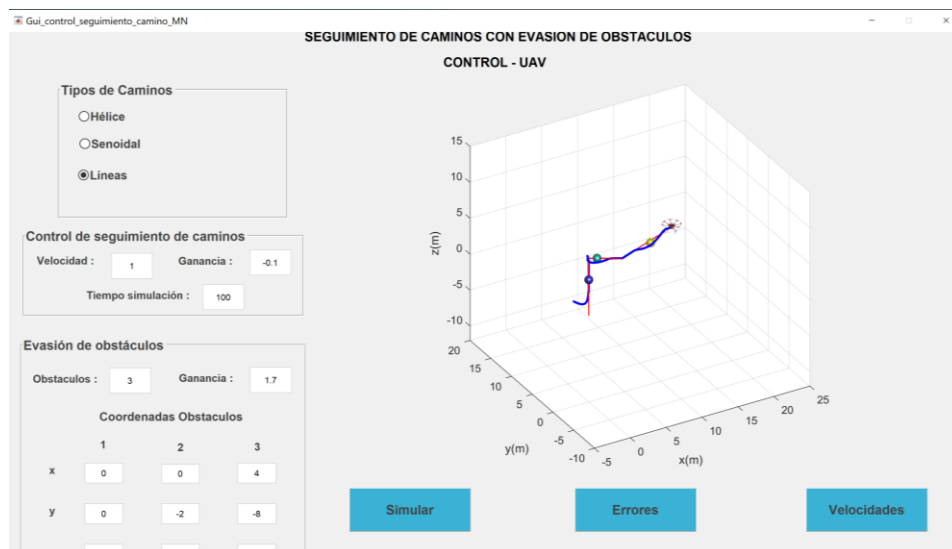
**Figura 4.48.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino

Al comparar las Figuras 4.47 y 4.48 se puede observar que el dron no puede superar el obstáculo al mover el objeto al centro del camino. Con esto se puede concluir que, dependiendo de la posición en la que se encuentre el objeto con referencia al camino, el dron puede o no puede superar la esfera.

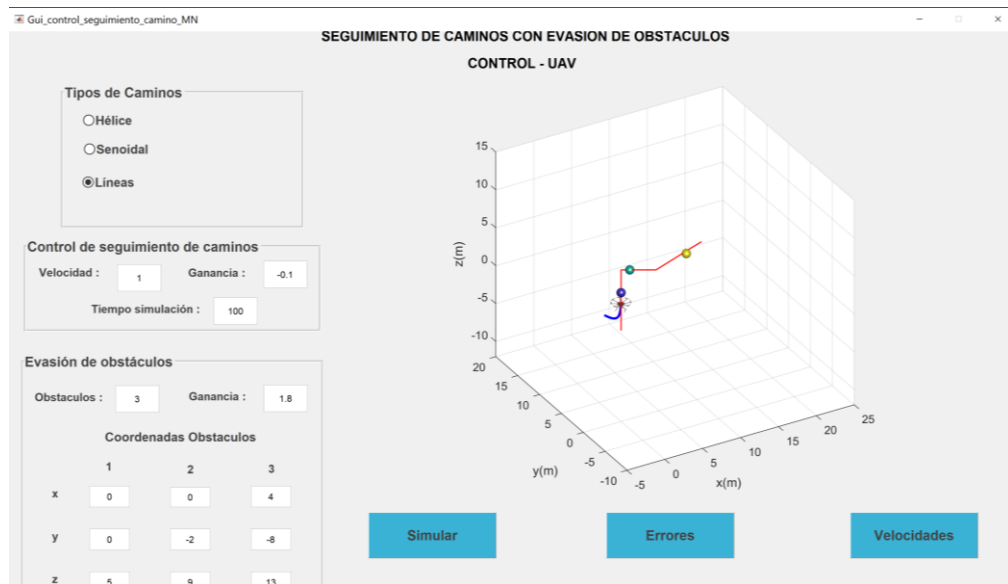
Para verificar lo mencionado en el párrafo anterior, se realizaron las simulaciones mostradas en las Figuras 4.49, 4.50 y 4.51, las cuales son las mismas que se realizaron en el análisis del control de seguimiento de camino: Líneas con 3 obstáculos con  $W = -0.1$ , pero se ubicó el primer objeto en el centro del camino.



**Figura 4.49.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino



**Figura 4.50.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino



**Figura 4.51.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino

En la Tabla 4.13 se observó que la UAV puede seguir el camino y superar los obstáculos sin colisiones para valores de  $W = -0.1$  y  $Ganancia \geq 2.4$ . Por otro lado, como se muestra en la Tabla 4.14, el dron solo puede completar el camino para valores de  $Ganancia < 1.8$  y la UAV no logra completar el camino con la  $Ganancia = 1.8$ .

**Tabla 4.14.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq Ganancia \leq 4$  y  $W = -1$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	1.6	SI	40	18	14	3
-0.1	1.7	SI	47	16	13	3
-0.1	1.8	NO	0	0	0	0

Con base en lo observado, se puede concluir que la capacidad de funcionamiento del control de seguimiento de camino con obstáculos depende de la posición de las esferas con referencia al camino seguido, por lo que se recomienda que el camino que se construya para llegar a su objetivo, pase a un lado de las esferas.

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1. Conclusiones

El presente trabajo pretendió verificar el funcionamiento del control de seguimiento de camino con evasión de obstáculos, para lo cual se modeló e implementó la simulación del sistema de control mediante Matlab. Con esto fue posible obtener las respuestas del sistema frente a la variación de los parámetros de funcionamiento del controlador. Los datos obtenidos permitieron realizar un análisis de la funcionalidad del controlador, sus limitaciones y características, lo cual aporta al desarrollo de la ciencia y de la aplicación de esta técnica en aplicaciones reales y se concluye que el trabajo ha cumplido con lo esperado.

Por medio de la modelación y la simulación del control de seguimiento de camino de un robot UAV, se consiguió verificar el funcionamiento del método de control basado en métodos numéricos. Además, se identificó los parámetros en los que el dron puede completar el camino con el menor error y oscilaciones. También se establecieron las características del camino que puede seguir el robot.

En el apartado de evasión de obstáculos se pudo definir los parámetros en los que es efectivo el seguimiento del dron y de qué manera afecta la posición del obstáculo con referencia al camino, para que la UAV pueda o no pueda completar la trayectoria.

Las conclusiones generadas por el presente trabajo son:

- Se logró conseguir el modelo matemático mediante la aplicación de criterios geométricos con lo cual se obtuvo un modelo cinemático de la UAV, donde se consideró al dron como un punto que se mueve en el espacio, con  $x$  e  $y$  que varían en función de los ángulos y  $z$  que se mueve de forma constante para arriba o para abajo según sea el camino que va a seguir el robot.
- En el desarrollo del control de seguimiento de caminos mediante métodos numéricos, se encontró que al tomar en consideración el método de Euler explícito en el análisis de estabilidad, existe un error constante  $\delta_{e_x}(0)$  que no permite al sistema llegar a estabilizarse. Debido a esto, se utilizó Euler implícito, el cual es estable para valores de  $-1 \leq W \leq 0$ .



- La simulación del comportamiento del dron, mediante la utilización de Matlab, permitió implementar el control de seguimiento de camino con obstáculos y su verificación demostró que la UAV es capaz de seguir los 3 caminos programados y el dron es capaz de esquivar los obstáculos cuando estos se activaban. Con base a esto se puede afirmar que el comportamiento del sistema de control es el esperado.

El análisis de la respuesta del sistema al seguimiento de los caminos: Hélice, Senoidal y Líneas, con y sin obstáculos, permitió obtener las siguientes conclusiones:

- Los datos obtenidos de la simulación mostrados en los Anexos, permiten identificar los valores de  $W$  con los cuales el dron puede completar el camino con el menor promedio de errores y disminuyendo sus oscilaciones de  $W = -0.8, 0.6$  y  $0.6$ , para los caminos Hélice, Senoidal y Líneas, respectivamente.
- En las pruebas realizadas al control de seguimiento del camino Líneas, se encontró que el sistema puede seguir el camino solo hasta cierto ángulo entre las rectas, que en promedio es  $\alpha \leq 270$ . Esto se debe a que el dron siempre busca el punto del camino más cercano y cuando el  $\alpha \geq 270$ , el punto más próximo es el mismo vértice por lo que el dron se trunca en un laso de acercarse y alejarse.
- Se encontró que el dron puede realizar el recorrido del camino Hélice y Líneas con los 3 obstáculos para  $W = -0.1$  y  $Ganancia \geq 3$  y  $2.4 \leq Ganancia \leq 3.3$ , respectivamente, mientras que en el camino Senoidal no se encontraron parámetros que permitan completar el camino de la UAV sin colisionar con los objetos.
- Se constató que el éxito del control de seguimiento de caminos se ve afectado por la forma del camino y la posición de los obstáculos; además, la mejor forma de garantizar el funcionamiento correcto de este sistema de control es mediante un camino que no presente cambios abruptos de dirección ( $\alpha \leq 265$ ) y que los obstáculos no se encuentren directamente sobre el camino; adicionalmente, se encontró que el mejor valor para  $W$  es  $-0.1$  y, dependiendo de la posición de los objetos, la Ganancia podría ser  $\geq 1.6$  o  $\geq 3$ , entre otros, por lo que se recomienda realizar simulaciones antes de la implementación real en una UAV.

## 5.2. Líneas de trabajo futuro

- Mediante la aplicación de la información generada en el presente trabajo, se espera que en un futuro se implemente este sistema de control en una UAV real y se contraste si los datos obtenidos en las simulaciones representan el comportamiento real del dron.
- La aplicación de los métodos numéricos en los sistemas de control es una ciencia que está en desarrollo. El presente trabajo se centró en el método de Euler, por lo que puede resultar interesante la realización de pruebas adicionales con otros métodos numéricos para constatar la forma en la que varía el comportamiento del dron en la simulación.
- Como se pudo observar en los resultados obtenidos, el control de seguimiento de caminos responde de mejor manera para los caminos y obstáculos con diferentes valores de  $W$ , por lo que puede ser interesante el planteamiento de un sistema con una  $W$  que se adapte a las necesidades del dron en determinados momentos.

## 6. Bibliografía

- ABC. (10 de 06 de 2019). *ABC Soluciones*. Recuperado el 08 de 05 de 2020, de [https://www.abc.es/tecnologia/informatica/soluciones/abci-nuevos-drones-amazon-mas-inteligentes-esquivaran-manadas-pajaros-o-tendedero-edificio-para-entregarte-paquete-201906061827\\_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F](https://www.abc.es/tecnologia/informatica/soluciones/abci-nuevos-drones-amazon-mas-inteligentes-esquivaran-manadas-pajaros-o-tendedero-edificio-para-entregarte-paquete-201906061827_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F)
- Acosta , J., Andaluz, V., Rivera, G., y Salas, J. (2019). Energy-Saver Mobile Manipulator Based on Numerical Methods. *MDPI*, 26, doi:10.3390/electronics8101100.
- Adeva, R. (20 de 02 de 2020). *Adslzone.net*. Recuperado el 08 de 05 de 2020, de Adslzone: <https://www.adslzone.net/reportajes/drones/tipos-drones/>
- Andaluz, V., Sásig, E., Chicaiza, W., y Velasco Paola. (2017). Linear Algebra Applied to Kinematic Control of Mobile Manipulators. *IT Convergence and Security 2017*, 297-306, DOI: 10.1007/978-981-10-6451-7\_35.
- Bastidas , R., & Beauchchamp, G. (2016). Aplicación de Técnicas de Control Óptimo a una plataforma estacionaria cuatrimotor. *SciELO Analytics*, 15.
- Chapra, S., & Canele, R. (2006). *Métodos numéricos para ingenieros*. México: McGraw-Hill, Interamericana.
- Daneri, P. (2008). *PLC Automatización y Control Industrial*. Buenos Aires: Hispano Americana.
- García, E. (2015). *Robots*. Madrid: CSIC.
- González, F., Afanador, M., & Niño, E. (2019). Modelamiento y simulación de un quadrotor mediante la integración de Simulink y SolidWorks. *SciELO Analytics*, 20, doi.org/10.24133/maskay.v9i1.1043 .
- Heredia, M., Castro, C., y Oliveira, A. (2019). A New Hybrid Preconditioner for the Interior Point Method. *SciELO Analytics*, 11, doi.org/10.5540/tema.2019.020.02.0359 .
- Hernández, L., Valeriano, Y., Hernández, A., & Hernández , L. (2017). Estudio sobre la estrategia de guiado L1 para el seguimiento de caminos rectos y curvos en UAV. *SciELO Analytics*, 15.
- Jordán, J., & Baqués, J. (2014). *Gerra de Drones*. Madrid: Biblioteca Nueva.

- Moralena, A., & Villaba, C. (2013). *Modelado y simulación de eventos discretos*. Madrid: UNED.
- Olegovych, I., & Yakovych, S. (2019). Adaptive Filtration of Parameters of the UAV Movement Based on the TDOA-Measurement Sensor Networks. *SciELO Analytics*, 12, doi.org/10.5028/jatm.v11.1062 .
- Roca , A. (2014). *Control Automático de Procesos Industriales*. Madrid: Díaz de Santos.
- Rosales, A., Scaglia, G., Mut, V., & Sciascio, F. (2009). Navegación de Robots Móviles en Entornos no Estructurados utilizando Álgebra Lineal. *RIAI*, 79-88.
- Salazar, I. (2019). *La revolución de los robots*. Asturias: Trea.
- Samaniego, P., & Vaca, E. (2017). *Diseño y simulación de dos estrategias de control basado en espacio nulo y tipo pid para una formulación de cuadricópteros*. Quito: EPN.
- Scaglia, G., Mut, V., Quintero, O., y Sciascio, F. (2009). Diseño de un controlador basado en métodos algebraicos: aplicación a robotica movil. *ScienceDirect*, 79-88, doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70096-2.
- Sciascio, F., Rosales, A., Eduardo, G., y Mut, V. (2006). Diseño de un controlador mediante métodos numéricos para un problema no lineal clásico: RTAC (Rotational Translational Actuator). *Congreso Latinoamericano de Control Automático*, 7.
- Torres, F. (2016). *El Dron Aplicado al Sector Audiovisual*. Madrid: Tébar Flores.
- Vázquez, L., Jiménez , S., Aguirre, C., & Pascual, P. (2009). *Métodos numéricos para la Física y la Ingeniería*. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

# PROGRAMA DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINOS, MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS, CON EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

```

function varargout = Gui_control_seguimiento_camino_MN(varargin)
% GUI_CONTROL_SEGUIMIENTO_CAMINO_MN MATLAB código en
Gui_control_seguimiento_camino_MN.fig
% GUI_CONTROL_SEGUIMIENTO_CAMINO_MN.

% Inicio de la guía.

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Gui_control_seguimiento_camino_MN_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Gui_control_seguimiento_camino_MN_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% Inicio del código

function Gui_control_seguimiento_camino_MN_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% hObject Encargada de la Figura

handles.output = hObject;

% Actualización de estructura
guidata(hObject, handles);
set(handles.axes2,'visible','off');
set(handles.axes3,'visible','off');

% UIWAIT makes Gui_control_seguimiento_camino_MN wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- La salida vuelve a la línea del comando
function varargout = Gui_control_seguimiento_camino_MN_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
varargout{1} = handles.output;

% botón pushbutton
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

clear global
global hxe

```

```

global hye
global hze
global yawe
global uf
global ul
global uz
global w
global t

tf=str2double(get(handles.edit15,'String')); %tiempo de simulación
ts=0.1; % tiempo de muestro
t=0:ts:tf; % vector tiempo
N = length(t); % número de muestras

x(1) = 0;          %posición inicial en el eje x del centro del uav en (m)
y(1) = 4;          %posición inicial en el eje y del centro del uav en (m)
z(1) = 0;          %posición inicial en el eje z del centro del uav en (m)
yaw(1)= 0*(pi/180); %orientación inicial yaw en (radianes)

a=0.1; %distancia al punto de control

hx(1)=x(1)+a*cos(yaw(1)); % posición inicial en el punto de control el eje x en (m)
hy(1)=y(1)+a*sin(yaw(1)); % posición inicial en el punto de control el eje y en (m)
hz(1) = z(1);          % posición inicial en el punto de control el eje z en (m)

%%%%%%%%%%%%%% Camino deseado Hélice %%%%%%%%%%%%%%%

paso = 0.001;
p=0:paso:8*pi; % vector de puntos de 0 a 8*pi

isC = get(handles.radiobutton4,'Value');
isS = get(handles.radiobutton5,'Value');
isL = get(handles.radiobutton6,'Value');

if isC ==1
    pxd = 4*sin(p); % camino deseado en el eje x en (m)
    pyd = 4*cos(p); % camino deseado en el eje y en (m)
    pzd = 0.5*p;
elseif isS == 1
    pyd = 4*sin(p); % camino deseado en el eje x en (m)
    pxd = 0.8*(p); % camino deseado en el eje y en (m)
    pzd = 0.3*(p);
elseif isL == 1
    n=260;
    tp=0:n:6;
    pxd =[linspace(0,0,n), linspace(0,0,n), linspace(0,6,n)];
    pyd =[linspace(0,0,n), linspace(0,-8,n), linspace(-8,-8,n)];
    pzd =[linspace(0,8,n), linspace(8,12,n), linspace (12,14,n)];

end

```



```

Q=length(pxd); % cantidad de puntos
%pzd = 7*ones(1,Q); % camino deseado en el eje z en (m)

yawd = pi/4; % ángulo yaw deseado

beta = zeros(1,Q); % vector ceros para almacenar el ángulo beta
gamma = zeros(1,Q); % vector ceros para almacenar el ángulo gamma

% Cálculo de ángulos (Forward and Backward Euler Methods)
for i=1:Q
    if i==1
        % Euler forward o hacia adelante
        beta(i)=atan2(pyd(i+1)-pyd(i),pxd(i+1)-pxd(i));
        gamma(i) = atan2(pzd(i+1)-pzd(i),sqrt((pxd(i+1)-pxd(i))^2+(pyd(i+1)-pyd(i))^2));
    else
        % Euler Backward o hacia atrás
        beta(i)=atan2(pyd(i)-pyd(i-1),pxd(i)-pxd(i-1));
        gamma(i) = atan2(pzd(i)-pzd(i-1),sqrt((pxd(i)-pxd(i-1))^2+(pyd(i)-pyd(i-1))^2));
    end
end

vMax=str2double(get(handles.edit12,'String'));% Velocidad máxima a la que se mueve el
drone

ro = [0.5 0.5 0.5]; % Radios de esfera que representa los obstáculos

dseg = 2; % Distancia de seguridad

% Ubicación de los objetos en x y z
ho = [str2double(get(handles.x1,'String')) str2double(get(handles.x2,'String'))
str2double(get(handles.x3,'String'));...
str2double(get(handles.y1,'String')) str2double(get(handles.y2,'String'))
str2double(get(handles.y3,'String'));...
str2double(get(handles.z1,'String')) str2double(get(handles.z2,'String'))
str2double(get(handles.z3,'String'))];

numObstacle = str2double(get(handles.edit1,'String')); % número de obstáculos
gainControl = str2double(get(handles.edit14,'String'));
gainEvasion = str2double(get(handles.edit13,'String'));

contx=0;
conty=0;
contz=0;
contyaw=0;
oscx=0;
oscy=0;
oscz=0;
oscyaw=0;
contcho1=0;
contcho2=0;

```

```

contcho3=0;

for k=1:N
    %%%%%%%%%% Controlador
    %%%%%%%%%%

    %Valor cercano
    minimo=100;
    for i=1:Q
        aux=sqrt((pxd(i)-hx(k))^2+(pyd(i)-hy(k))^2+(pzd(i)-hz(k))^2); % distancia euclidiana
        if aux<minimo
            minimo=aux;
            pos=i; %posición
        end
    end

    %a) Errores de control
    hxe(k) = pxd(pos) - hx(k);
    hye(k) = pyd(pos) - hy(k);
    hze(k) = pzd(pos) - hz(k);
    yawe(k) = yawd - yaw(k);

    % Error pasado
    if k==1
        lastError=[hxe(k);hye(k);hze(k);yawe(k)]; % vector de errores;
    else
        lastError=[hxe(k-1);hye(k-1);hze(k-1);yawe(k-1)];% vector de errores;
    end

    choque1=sqrt((hx(k)-ho(1)).^2+(hy(k)-ho(2)).^2+(hz(k)-ho(3)).^2);
    choque2=sqrt((hx(k)-ho(4)).^2+(hy(k)-ho(5)).^2+(hz(k)-ho(6)).^2);
    choque3=sqrt((hx(k)-ho(7)).^2+(hy(k)-ho(8)).^2+(hz(k)-ho(9)).^2);

    if (ro(1)+0.7)>=choque1
        contcho1=contcho1+1;
    end
    if (ro(2)+0.7)>=choque2
        contcho2=contcho2+1;
    end
    if (ro(3)+0.7)>=choque3
        contcho3=contcho3+1;
    end

    ModError(k)=sqrt(hxe(k).^2+hye(k).^2+hze(k).^2);

    if k>2
        %Calculo de oscilación de errores en x
        xe2=abs(hxe(k-2));
        xe1=abs(hxe(k-1));
        xe=abs(hxe(k));
        if xe1>xe2&&xe<=xe1

```

```

    oscx=oscx+1;
end

%Calculo de oscilación de errores en y
ye2=abs(hye(k-2));
ye1=abs(hye(k-1));
ye=abs(hye(k));
if ye1>ye2&&ye<=ye1
    oscy=oscy+1;
end

%Calculo de oscilación de errores en z
ze2=abs(hze(k-2));
ze1=abs(hze(k-1));
ze=abs(hze(k));
if ze1>ze2&&ze<=ze1
    oscz=oscz+1;
end

%Calculo de oscilación de errores en yawe
yawe2=abs(yawe(k-2));
yawe1=abs(yawe(k-1));
yawe0=abs(yawe(k));
if yawe1>yawe2&&yawe0<=yawe1
    oscyawe=oscyawe+1;
end

end

if k>1
%Calculo de oscilación de errores en x
if hxe(k-1)>=0&&hxe(k)<=0
    contx=contx+1;
end
if hxe(k-1)<0&&hxe(k)>0
    contx=contx+1;
end

%Calculo de oscilación de errores en y
if hye(k-1)>=0&&hye(k)<=0
    conty=conty+1;
end
if hye(k-1)<0&&hye(k)>0
    conty=conty+1;
end

%Calculo de oscilación de errores en z
if hze(k-1)>=0&&hze(k)<=0
    contz=contz+1;
end
if hze(k-1)<0&&hze(k)>0
    contz=contz+1;
end
end

```

```

%Calculo de oscilación de errores en yawe
if yawe(k-1)>=0&&yawe(k)<=0
    contyawe=contyawe+1;
end
if yawe(k-1)<0&&yawe(k)>0
    contyawe=contyawe+1;
end
end

% Matriz Jacobiana (Modelo Cinemático)
J=[cos(yaw(k)) -sin(yaw(k)) 0 -a*sin(yaw(k));...
   sin(yaw(k)) cos(yaw(k)) 0 a*cos(yaw(k));...
   0 0 1 0;...
   0 0 0 1];

% Matriz de diagonal de ganancia entre 0 y 1
W = gainControl*[1 0 0 0;...
  0 1 0 0;...
  0 0 1 0;...
  0 0 0 1];

% Calculo de velocidades deseadas
pxdp(k)=vMax*cos(gamma(pos))*cos(beta(pos));
pydp(k)=vMax*cos(gamma(pos))*sin(beta(pos));
pzdp(k)=vMax*sin(gamma(pos));

pdp=[pxdp(k);pydp(k);pzdp(k);0]; % Vector de velocidades
vecvel(:,k)=[pxdp(k);pydp(k);pzdp(k);0];
time(k)=k;

h = [hx(k);hy(k);hz(k)]; % vector de posicion del robot ene le instante k

vo = velocityObstacle(h,ho,gainEvasion,numObstacle,dseg,ro); % Calcular velocidad de
evasion

% Ley de control con evasion de obstaculo
v = pinv(J)*(pdp-W*(lastError/ts))+[vo 0]';

% Separar acciones de control
uf(k)=v(1);
ul(k)=v(2);
uz(k)=v(3);
w(k)=v(4);

% Aplicar velocidades al robot (Modelo Robot)
xrp(k)=uf(k)*cos(yaw(k))-ul(k)*sin(yaw(k))-a*w(k)*sin(yaw(k));
yrp(k)=uf(k)*sin(yaw(k))+ul(k)*cos(yaw(k))+a*w(k)*cos(yaw(k));
zrp(k)=uz(k);

% Calcular posición y orientación del robot ( Integral numérica)
hx(k+1)=hx(k)+ts*xrp(k);
hy(k+1)=hy(k)+ts*yrp(k);

```

```

hz(k+1)=hz(k)+ts*zrp(k);

yaw(k+1)=yaw(k)+ts*w(k);

% Calcular posición y orientación del robot en el centro del robot
x(k+1)=hx(k+1)-a*cos(yaw(k+1));
y(k+1)=hy(k+1)-a*sin(yaw(k+1));
z(k+1) = hz(k+1);
end

format longe
errojes=min(ModError);
tini=5/0.1
tfin=tf/0.1-5/0.1

calprome=0;
for epr=tini:tfin

    calprome=calprome+ModError(epr);

end

errorprome=calprome/(tfin-tini)

erroryaw=min(abs(yawe));
errores=[errojes;erroryaw];
format short
cont=[contx,conty,contz,contyaw];
osc=[oscx,oscy,oscz,oscyawe];
Velocejes=[max(vecvel(1,:)),max(vecvel(2,:)),max(vecvel(3,:));min(vecvel(1,:)),min(vecvel(2,:)),min(vecvel(3,:))];

contcho=[contcho1, contcho2, contcho3]

%c) Dibujo del Robot

% Asignación del campo axes para la función a graficar.
cla(handles.axes2,'reset'); % Do a complete and total reset of the axes.
cla(handles.axes3,'reset'); % Do a complete and total reset of the axes.
cla(handles.axes1,'reset'); % Do a complete and total reset of the axes.

set(handles.axes2,'visible','off');
set(handles.axes3,'visible','off');
set(handles.axes1,'visible','on');
```

```
axes(handles.axes1);
```

```
M1=plot3(hx(1),hy(1),hz(1),'b','LineWidth',2);hold on % graficar punto inicial del robot
M2 = plot3(pxd,pyd,pzd,'r','LineWidth',1); % graficar camino deseado
M3=robotPlot(x(1),y(1),z(1),yaw(1),2); % Graficar uav
```

```
phi=linspace(0,pi,30);
theta=linspace(0,2*pi,40);
[phi,theta]=meshgrid(phi,theta);
```

```
% Graficar los obstáculos
```

```
for obs=1:numObstacle
    hxo=ro(obs)*sin(phi).*cos(theta)+ho(1,obs);
    hyo=ro(obs)*sin(phi).*sin(theta)+ho(2,obs);
    hzo=ro(obs)*cos(phi)+ho(3,obs);
    mesh(hxo,hyo,hzo);
```

```
end
```

```
camlight('headlight');
pasos=5; % velocidad de simulacion
xlabel('x(m)'); ylabel('y(m)'); zlabel('z(m)'); % Label axis
axis equal;
view(-30,30);
if isC ==1
    axis([-8 8 -8 8 -1 12]); grid on
elseif isS ==1
    axis([-2 18 -6 12 -6 10]); grid on
elseif isL ==1
    axis([-5 25 -10 20 -12 15]); grid on
end
```

```
for i=1:pasos:length(t)
```

```
    delete (M1);
    delete (M2);
    delete (M3);
```

```
    M1=plot3(hx(1:k),hy(1:k),hz(1:k),'b','LineWidth',2);
    M2 = plot3(pxd,pyd,pzd,'r','LineWidth',1);
    M3=robotPlot(x(i),y(i),z(i),yaw(i),2);
```

```
    pause(ts)
```

```
end
```

```
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
```

```

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
global hxe
global hye
global hze
global yawe
global t
Q = length(hxe);
cla(handles.axes1,'reset'); % Do a complete and total reset of the axes.
cla(handles.axes2,'reset'); % Do a complete and total reset of the axes.
cla(handles.axes3,'reset'); % Do a complete and total reset of the axes.

set(handles.axes1,'visible','off');
set(handles.axes2,'visible','on');
set(handles.axes3,'visible','on');

axes(handles.axes2)
cla reset; % Reseteo de los ejes.
plot(t(1:Q),hxe,'b','LineWidth',2),hold on,plot(t(1:Q),hye,'r','LineWidth',2),hold
on,plot(t(1:Q),hze,'g','LineWidth',2),grid on,xlabel('Time [s]'),ylabel('[m]'),legend('x','y','z')
axes(handles.axes3)
cla reset; % Reseteo de los ejes.
plot(t(1:Q),yawe,'b','LineWidth',2),grid on,xlabel('Time [s]'),ylabel('[rad]'),legend('psi')

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global uf
global ul
global uz
global w
global t
Q = length(uf);
cla(handles.axes1,'reset'); % Reseteo de los ejes.
cla(handles.axes2,'reset'); % Reseteo de los ejes.
cla(handles.axes3,'reset'); % Reseteo de los ejes.
set(handles.axes1,'visible','off');
set(handles.axes2,'visible','on');
set(handles.axes3,'visible','on');

axes(handles.axes2)
cla reset; % Reseteo de los ejes.

```

```

plot(t(1:Q),uf,'g','LineWidth',2),hold on,plot(t(1:Q),ul,'b','LineWidth',2),hold
on,plot(t(1:Q),uz,'r','LineWidth',2), grid on,xlabel('Time [s]'),ylabel('[m/s]'),legend('uf','ul','uz')
axes(handles.axes3)
cla reset; % Reseteo de los ejes.
plot(t(1:Q),w,'b','LineWidth',2),grid on,xlabel('Time [s]'),ylabel('[rad/s]'),legend('w')

```

```

function x1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function x1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function x2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function x2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function x3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```



```

function y1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y1 (see GCBO)

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function y2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function y3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y3 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y3 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function z1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z1 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function z2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z2 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function z3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z3 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit13 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit14 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit14 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes when selected object is changed in uibuttongroup2.
function uibuttongroup2_SelectionChangedFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to the selected object in uibuttongroup2
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit15 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit15 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.  
% See ISPC and COMPUTER.  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

## ANEXO II

# CONFIGURACIÓN DEL DRON Y LOS OBJETOS EN LA SIMULACIÓN

```
function robotParameters % Función que tiene todos los puntos que forman el robot
load 'octocopter.mat' chasis motor helice top forward;
% Carga los valores de cada elemento que compone el robot
global Robot; % Variable global

Robot.chasisVertices=chasis.vertices';
Robot.chasisFaces=chasis.faces;

Robot.motorVertices=motor.vertices';
Robot.motorFaces=motor.faces;

Robot.heliceVertices=helice.vertices';
Robot.heliceFaces=helice.faces;

Robot.topVertices=top.vertices';
Robot.topFaces=top.faces;

Robot.forwardVertices=forward.vertices';
Robot.forwardFaces=forward.faces;
```

```

function arm_Graph=robotPlot(x,y,z,psi,scaleRobot)
global Robot;
robotParameters; % Carga todos los puntos de la estructura del drone
z = z-scaleRobot*0.3;
% Matriz de rotación
Rz=[cos(psi) -sin(psi) 0; sin(psi) cos(psi) 0; 0 0 1];

%%%%%%%%%%%% base uav %%%%%%%%%%%%%%
armPatch = Rz*Robot.chasisVertices; % Aplicar la matriz de rotación a los vértices del
componente del robot
armPatch(1,:)=armPatch(1,:)*scaleRobot+x; %Escalar y desplazar en el eje x
armPatch(2,:)=armPatch(2,:)*scaleRobot+y; %Escalar y desplazar en el eje y
armPatch(3,:)=armPatch(3,:)*scaleRobot+z; %Escalar y desplazar en el eje z

arm_Graph(1) = patch('Faces',Robot.chasisFaces,'Vertices',armPatch,'FaceColor',[0.4 0.4
0.4],'EdgeColor','none'); % Patch dibujar el robot

%%%%%%%%%%%% base robot %%%%%%%%%%%%%%
armPatch = Rz*Robot.motorVertices; % Aplicar la matriz de rotación a los vértices del
componente del robot
armPatch(1,:)=armPatch(1,:)*scaleRobot+x; %Escalar y desplazar en el eje x
armPatch(2,:)=armPatch(2,:)*scaleRobot+y; %Escalar y desplazar en el eje y
armPatch(3,:)=armPatch(3,:)*scaleRobot+z; %Escalar y desplazar en el eje z

arm_Graph(2) =
patch('Faces',Robot.motorFaces,'Vertices',armPatch,'FaceColor','r','EdgeColor','none'); %
Patch dibujar el robot

%%%%%%%%%%%% base robot %%%%%%%%%%%%%%
armPatch = Rz*Robot.heliceVertices; % Aplicar la matriz de rotación a los vértices del
componente del robot
armPatch(1,:)=armPatch(1,:)*scaleRobot+x; %Escalar y desplazar en el eje x
armPatch(2,:)=armPatch(2,:)*scaleRobot+y; %Escalar y desplazar en el eje y
armPatch(3,:)=armPatch(3,:)*scaleRobot+z; %Escalar y desplazar en el eje z

arm_Graph(3) =
patch('Faces',Robot.heliceFaces,'Vertices',armPatch,'FaceColor','k','EdgeColor','none'); %
Patch dibujar el robot

%%%%%%%%%%%% base robot %%%%%%%%%%%%%%
armPatch = Rz*Robot.topVertices; % Aplicar la matriz de rotación a los vértices del
componente del robot
armPatch(1,:)=armPatch(1,:)*scaleRobot+x; %Escalar y desplazar en el eje x
armPatch(2,:)=armPatch(2,:)*scaleRobot+y; %Escalar y desplazar en el eje y
armPatch(3,:)=armPatch(3,:)*scaleRobot+z; %Escalar y desplazar en el eje z

arm_Graph(4) =
patch('Faces',Robot.topFaces,'Vertices',armPatch,'FaceColor','r','EdgeColor','none'); %
Patch dibujar el robot

```



```
%%%%%%%%%%%% base robot %%%%%%%%%%%%%%
armPatch = Rz*Robot.forwardVertices; % Aplicar la matriz de rotación a los vértices del
componente del robot
armPatch(1,:)=armPatch(1,:)*scaleRobot+x; %Escalar y desplazar en el eje x
armPatch(2,:)=armPatch(2,:)*scaleRobot+y; %Escalar y desplazar en el eje y
armPatch(3,:)=armPatch(3,:)*scaleRobot+z; %Escalar y desplazar en el eje z

arm_Graph(5) = patch('Faces',Robot.forwardFaces,'Vertices',armPatch,'FaceColor',[1 1
1],'EdgeColor','none'); % Patch dibujar el robot
```

```

function vo = velocityObstacle(h,ho,gainEvasion,obs,dseg,ro)

    hpo = zeros(3,obs);

    for k=1:obs
        lambda = ro(k)^2/(dseg+ro(k))^4;
        dUavOstacle = (h(1)-ho(1,k))^2+(h(2)-ho(2,k))^2+(h(3)-ho(3,k))^2;

        J = [-2*(h(1)-ho(1,k))*((ro(k)/dUavOstacle)^2+lambda),...
            -2*(h(2)-ho(2,k))*((ro(k)/dUavOstacle)^2+lambda),...
            -2*(h(3)-ho(3,k))*((ro(k)/dUavOstacle)^2+lambda)];

        if sqrt(dUavOstacle)>(dseg+ro(k))
            pf = 0;
        else
            pf = ro(k)^2/dUavOstacle - lambda*dUavOstacle;
        end

        hpo(:,k) = pinv(J)*gainEvasion*-pf;

    end

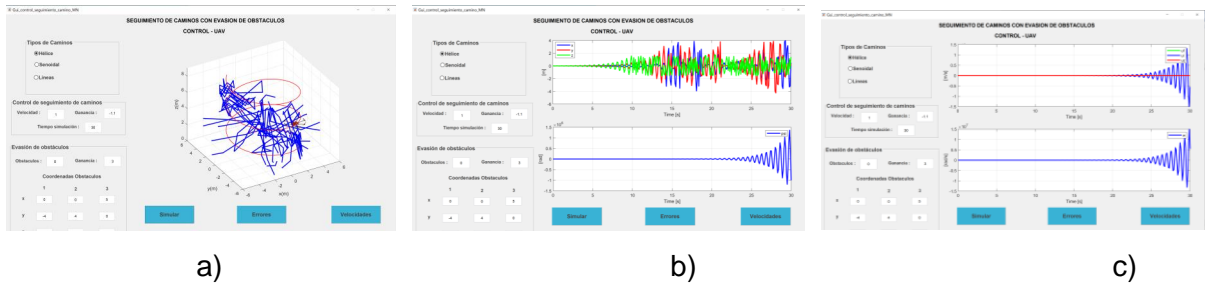
    vo(1) = sum(hpo(1,:));
    vo(2) = sum(hpo(2,:));
    vo(3) = sum(hpo(3,:));

end

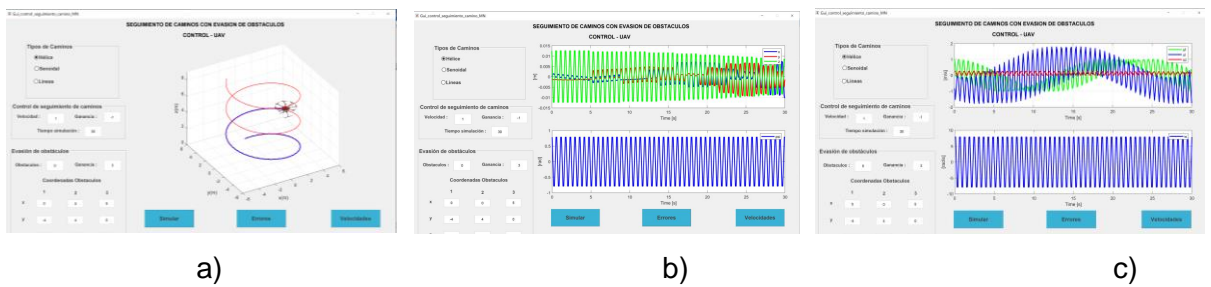
```

## ANEXO III

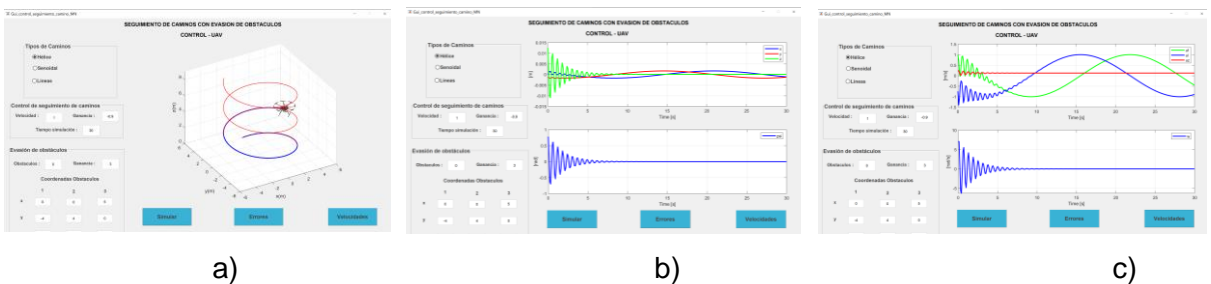
# GRÁFICAS DE LA RESPUESTA DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINOS: HÉLICE



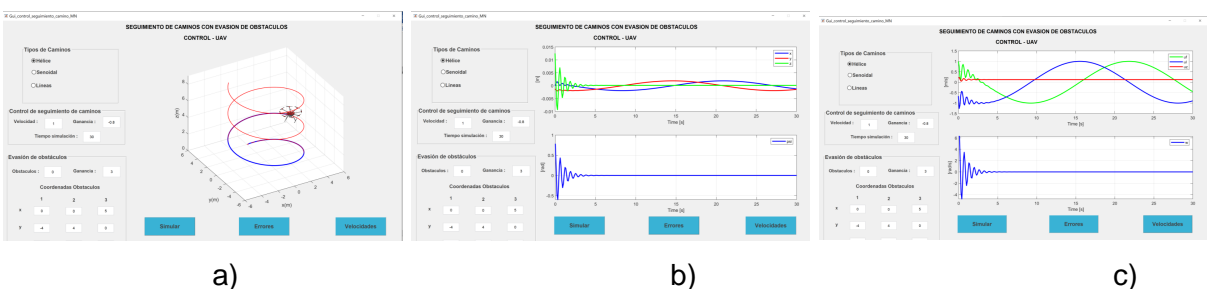
**Figura AIII. 1.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-1.1$  a) camino seguido por el dron, b) error producido en la simulación y c) variación de las velocidades en los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



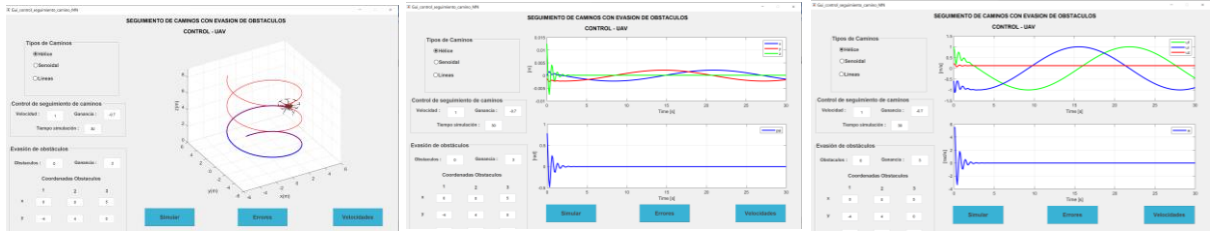
**Figura AIII. 2.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



**Figura AIII. 3.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-0.9$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



**Figura AIII. 4.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-0.8$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

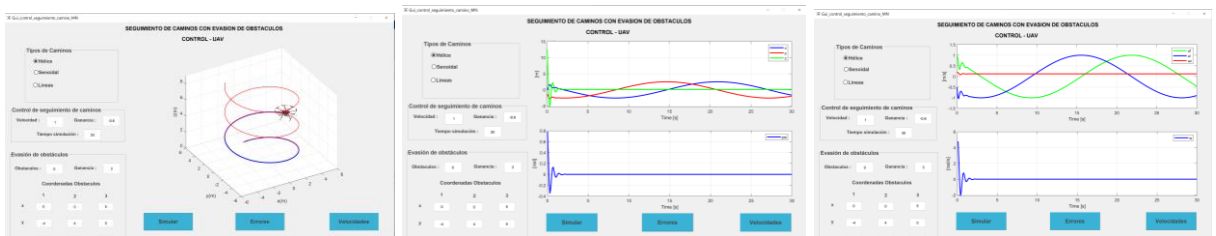


a)

b)

c)

**Figura AIII. 5.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de -0.7 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

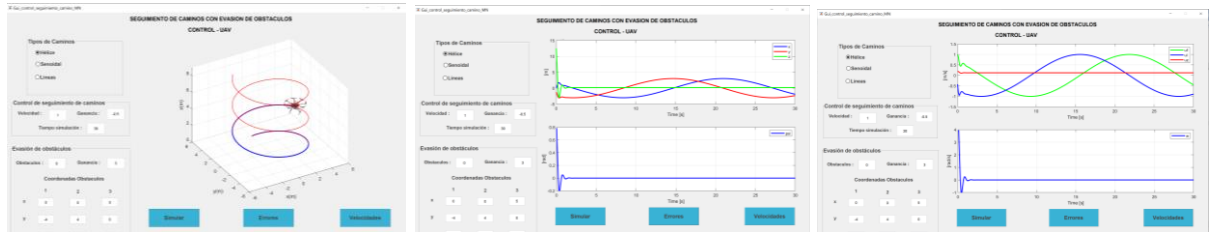


a)

b)

c)

**Figura AIII. 6.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de -0.6 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

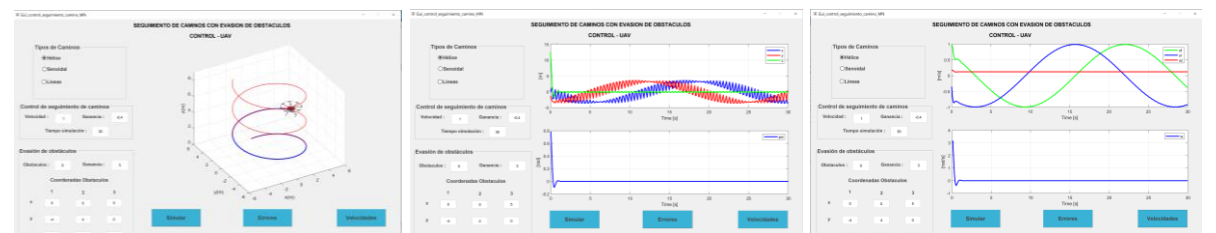


a)

b)

c)

**Figura AIII. 7.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de -0.5 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

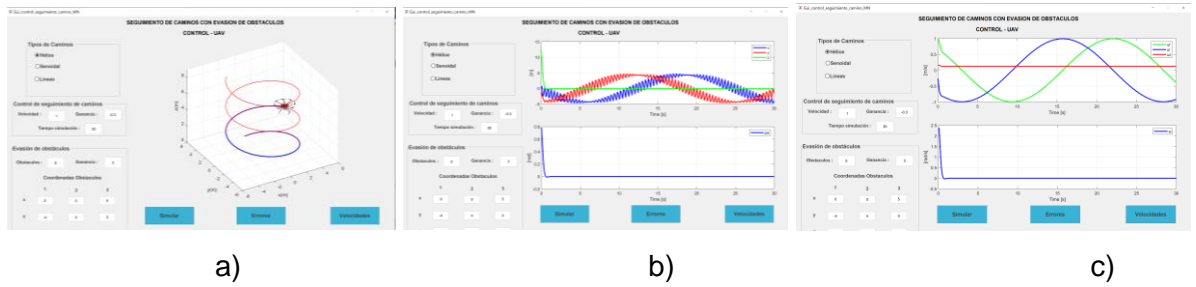


a)

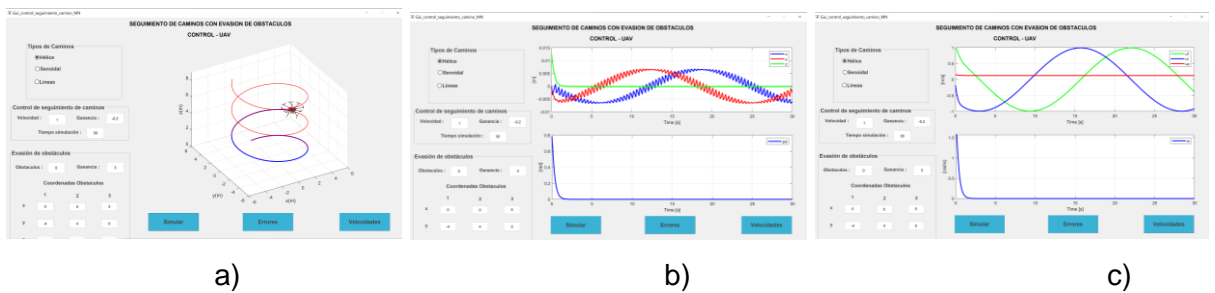
b)

c)

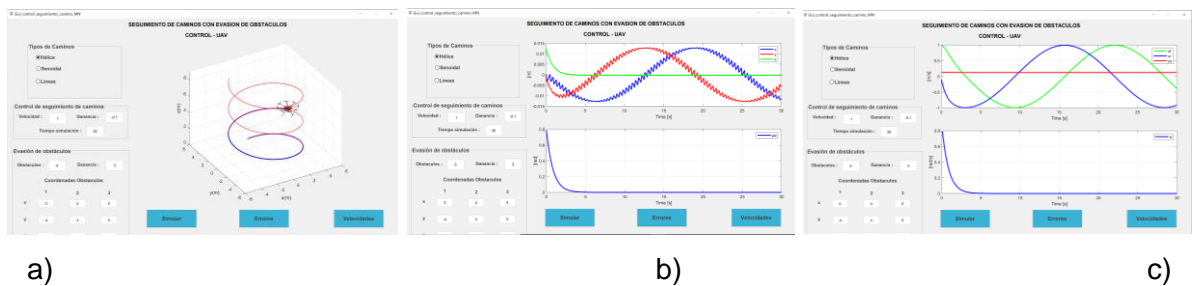
**Figura AIII. 8.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de -0.4 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



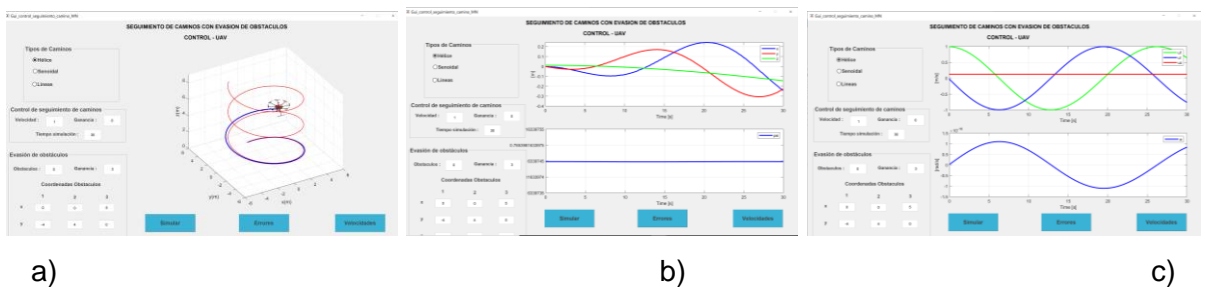
**Figura AIII. 9.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-0.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



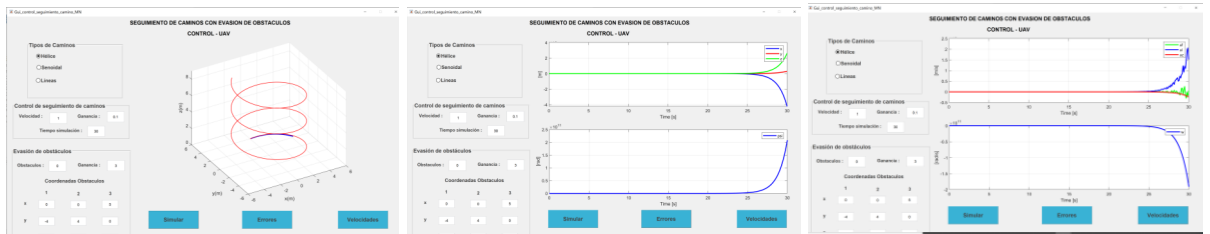
**Figura AIII. 10.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-0.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



**Figura AIII. 11.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $-0.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



**Figura AIII. 12.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de  $0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



a)

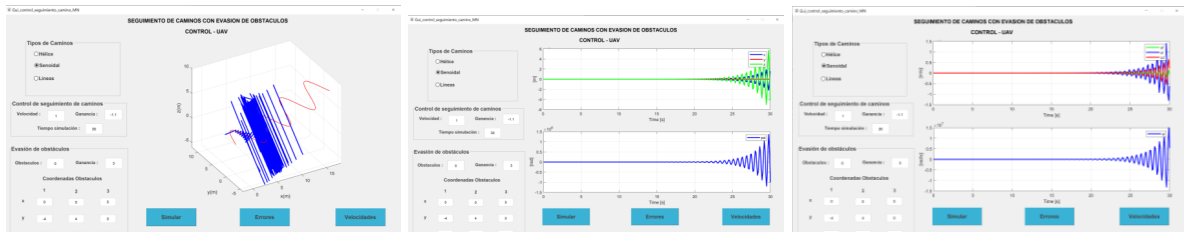
b)

c)

**Figura AIII. 13.** Simulación del seguimiento de camino: Hélice, con una ganancia de 0.1 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

ANEXO IV  
GRÁFICAS DE LA RESPUESTA DEL CONTROL DE  
SEGUIMIENTO DE CAMINOS: SENOIDE



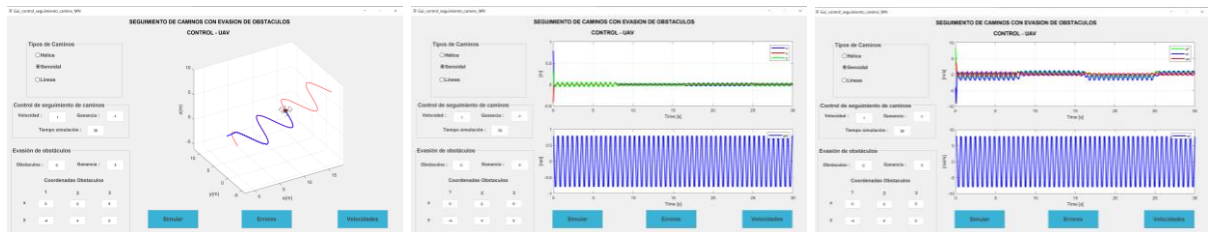


a)

b)

c)

**Figura AIV. 1.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-1.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

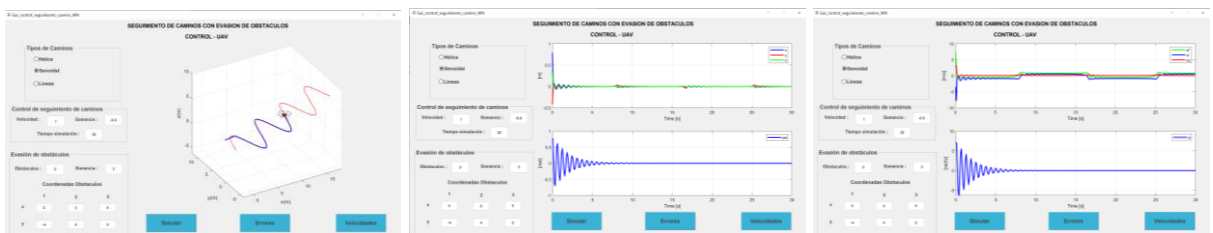


a)

b)

c)

**Figura AIV. 2.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

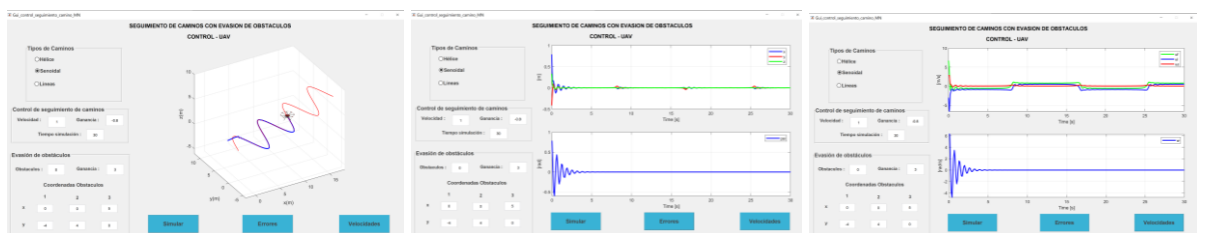


a)

b)

c)

**Figura AIV. 3.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.9$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

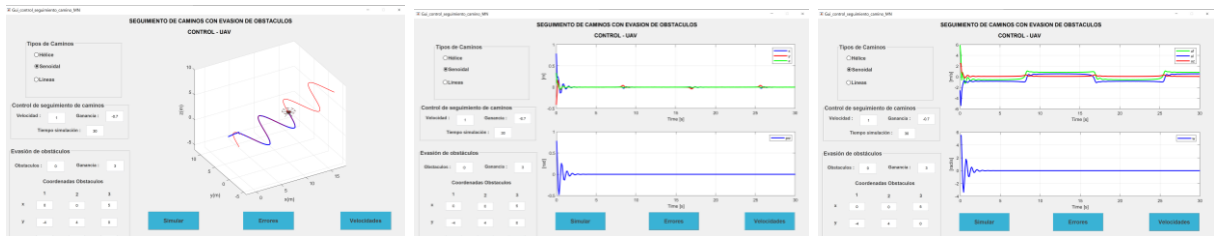


a)

b)

c)

**Figura AIV. 4.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.8$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

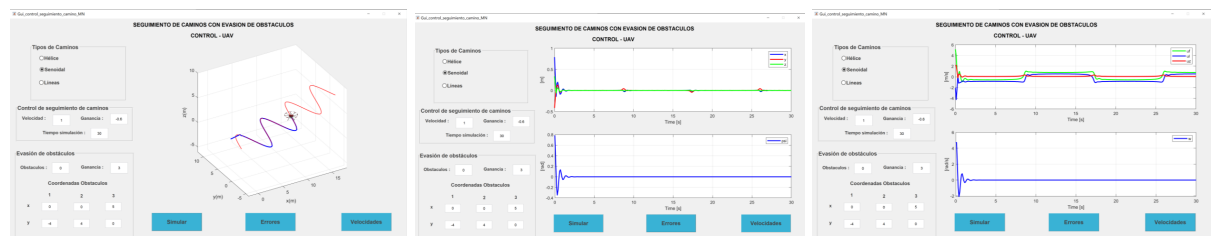


a)

b)

c)

**Figura AIV. 5.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

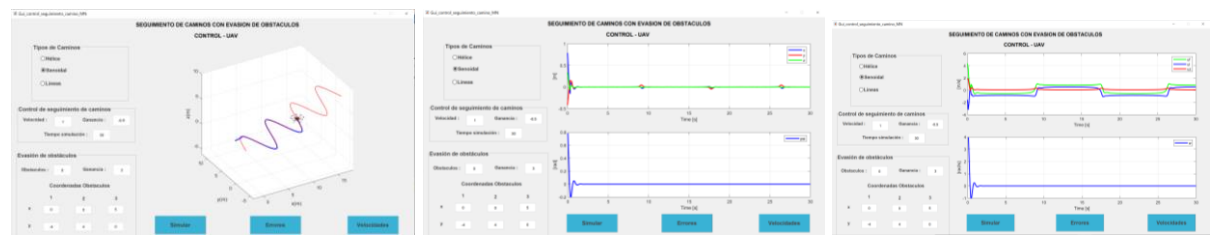


a)

b)

c)

**Figura AIV. 6.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.6$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

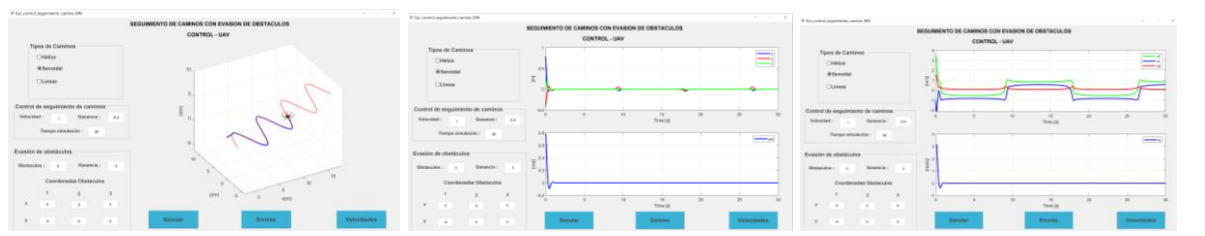


a)

b)

c)

**Figura AIV. 7.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

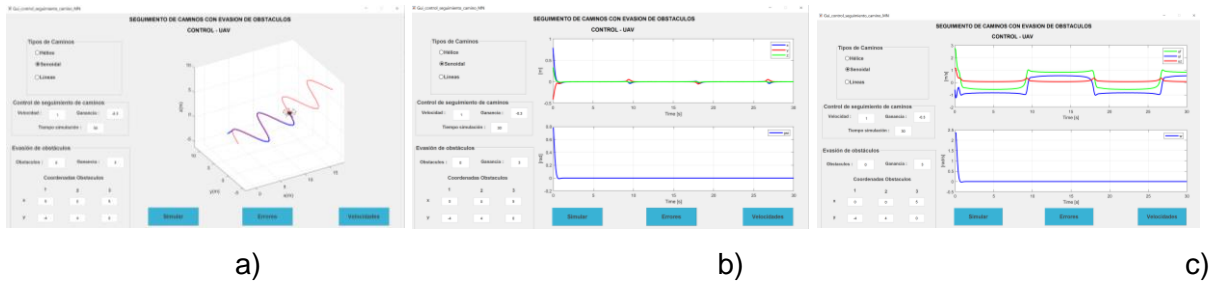


a)

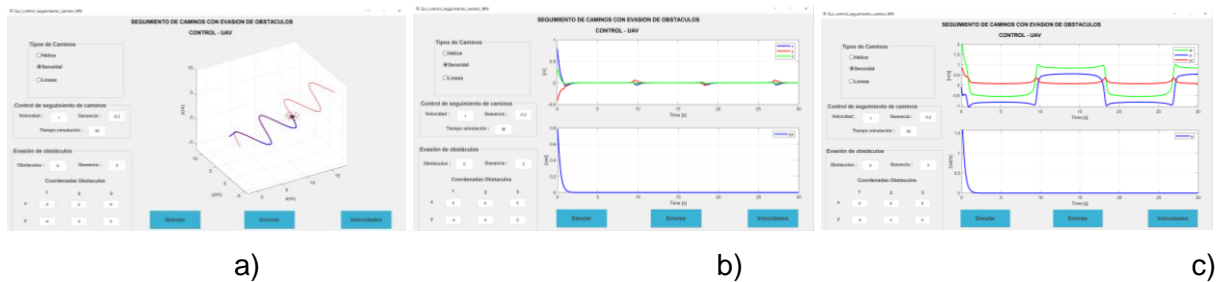
b)

c)

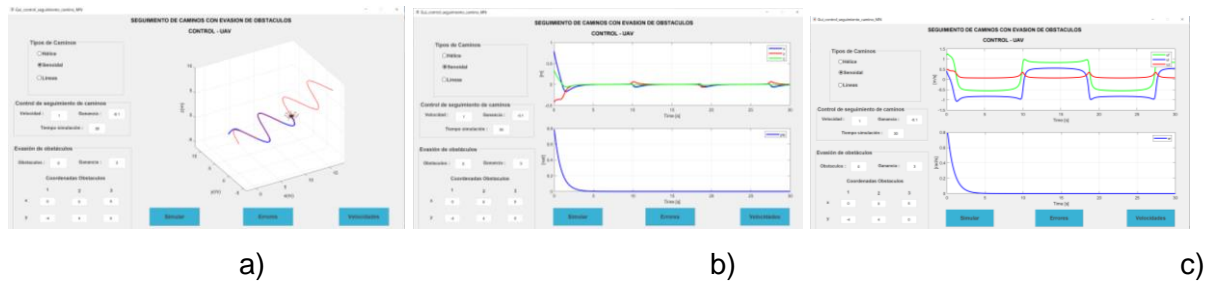
**Figura AIV. 8.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



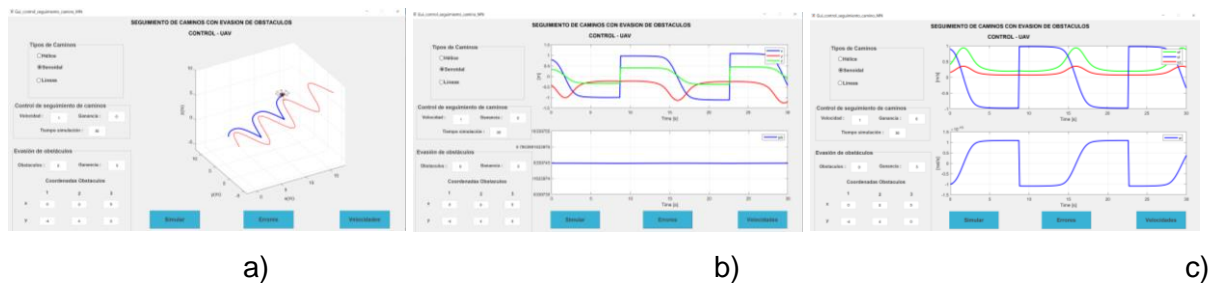
**Figura AIV. 9.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



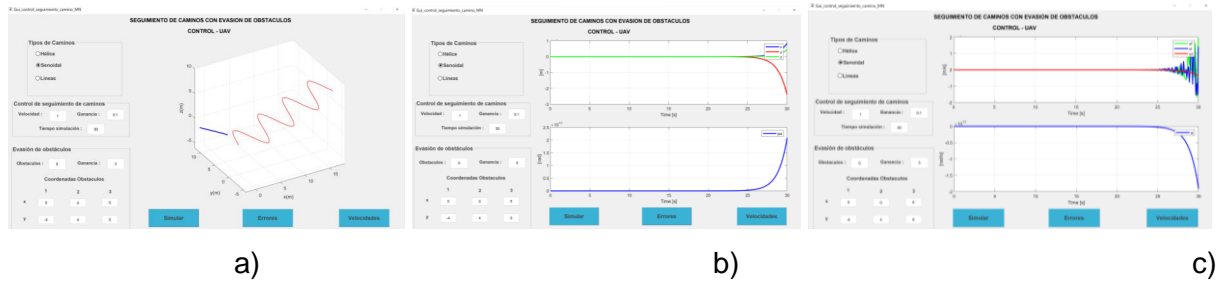
**Figura AIV. 10.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



**Figura AIV. 11.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $-0.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



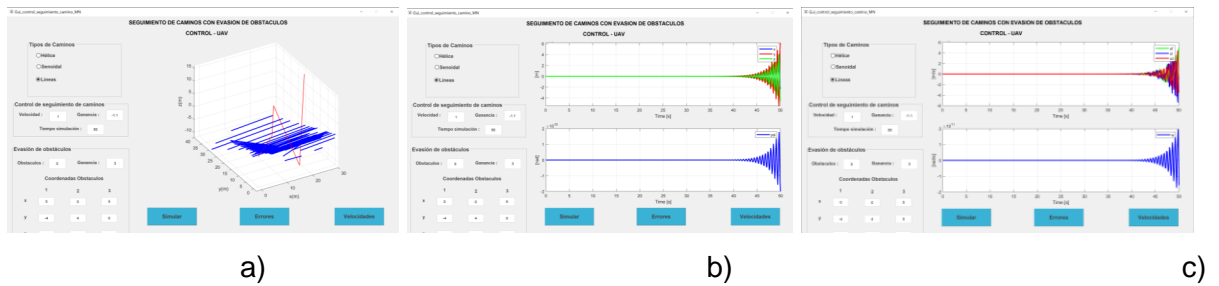
**Figura AIV. 12.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de  $0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



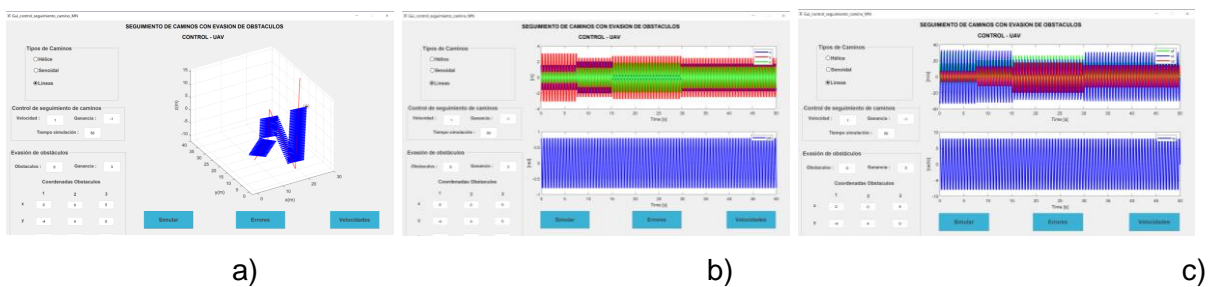
**Figura AIV. 13.** Simulación del seguimiento de camino: Senoide, con una ganancia de 0.1 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

## ANEXO V

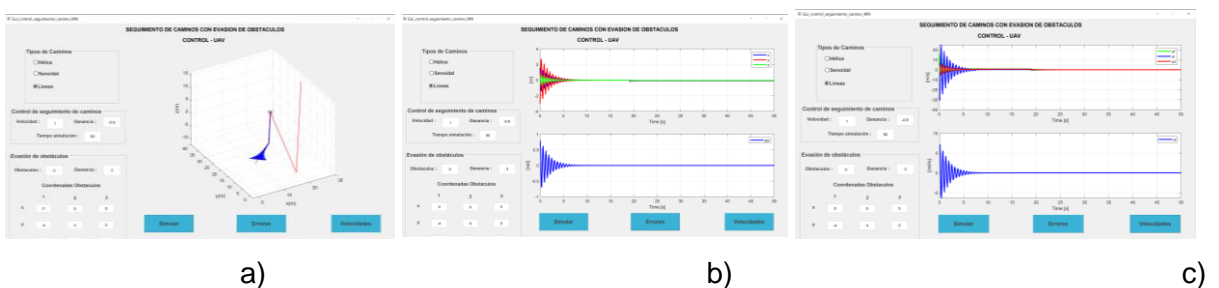
# GRÁFICAS DE LA RESPUESTA DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINOS: LÍNEAS



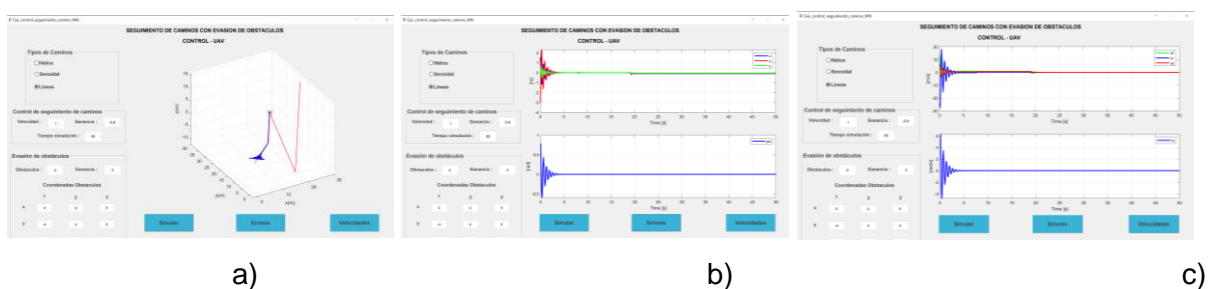
**Figura AV. 1.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-1.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



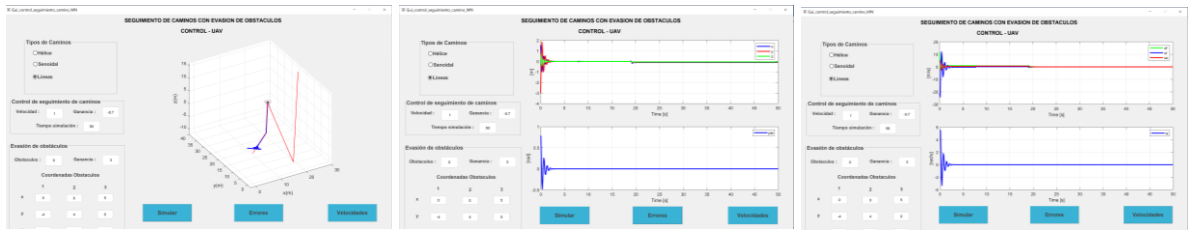
**Figura AV. 2.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



**Figura AV. 3.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.9$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



**Figura AV. 4.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.8$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .

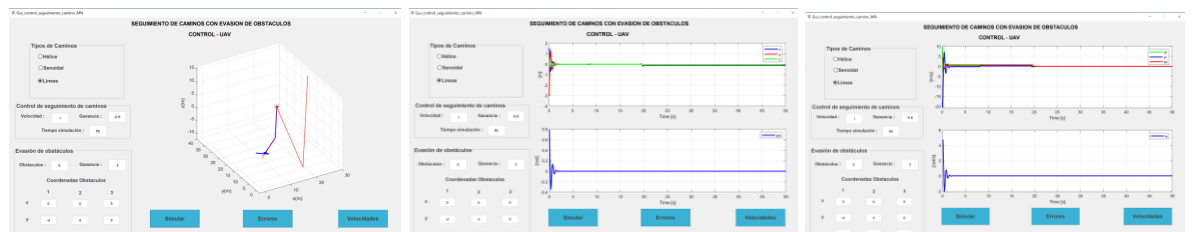


a)

b)

c)

**Figura AV. 5.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

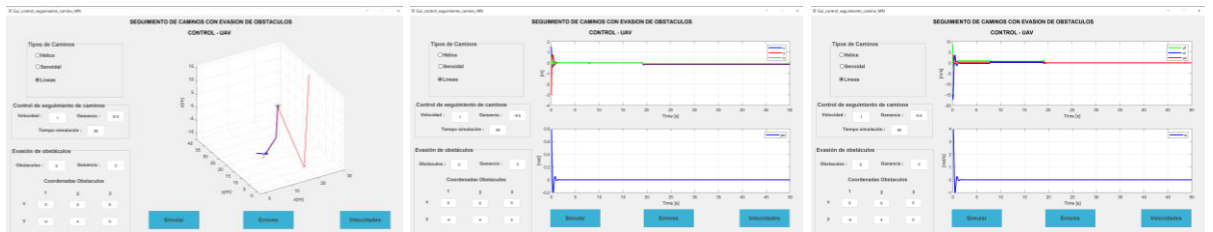


a)

b)

c)

**Figura AV. 6.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.6$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

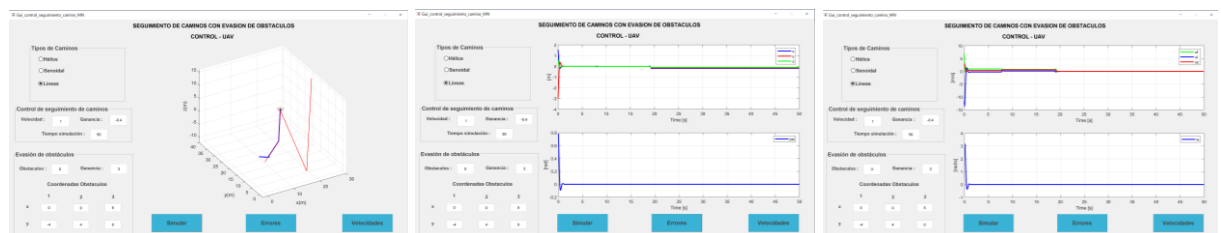


a)

b)

c)

**Figura AV. 7.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

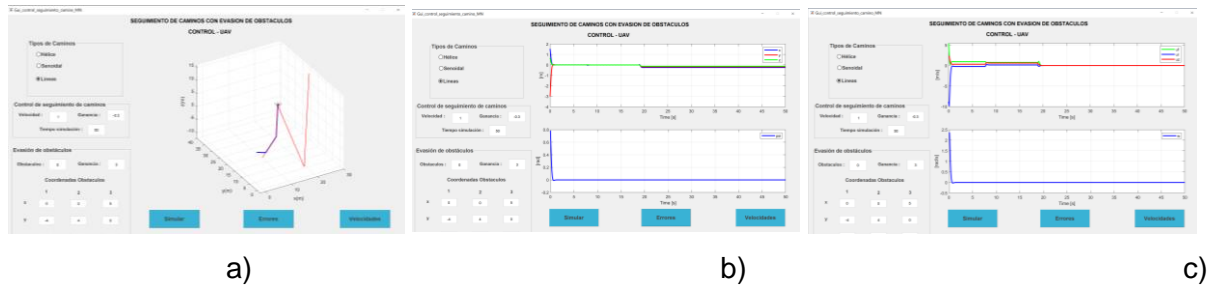


a)

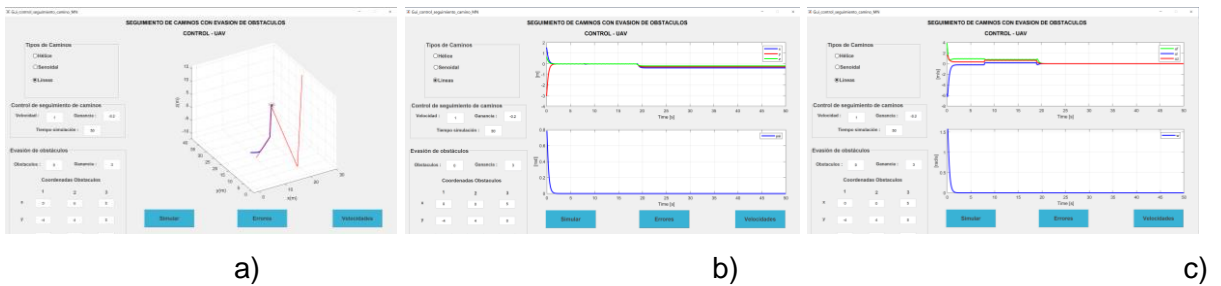
b)

c)

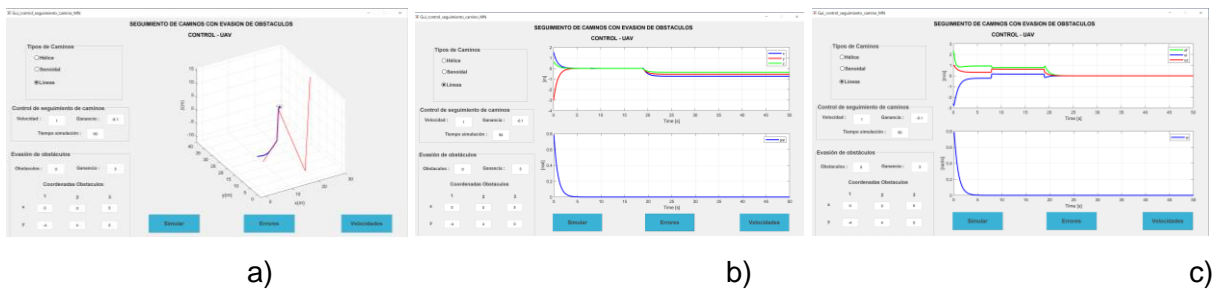
**Figura AV. 8.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



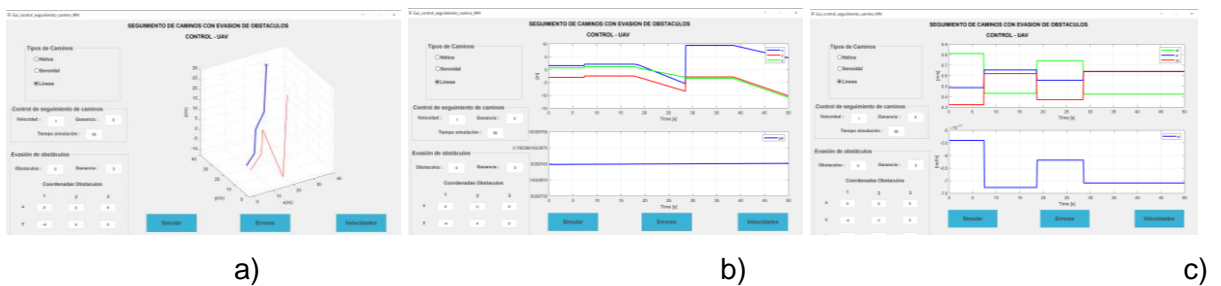
**Figura AV. 9.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



**Figura AV. 10.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

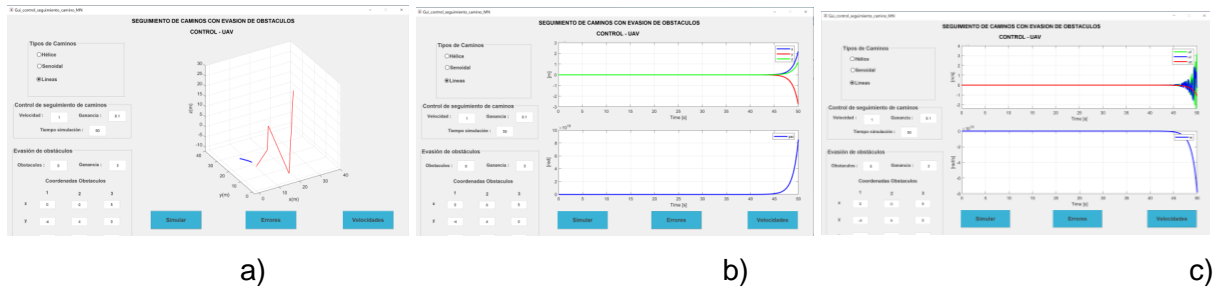


**Figura AV. 11.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $-0.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .



**Figura AV. 12.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de  $0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

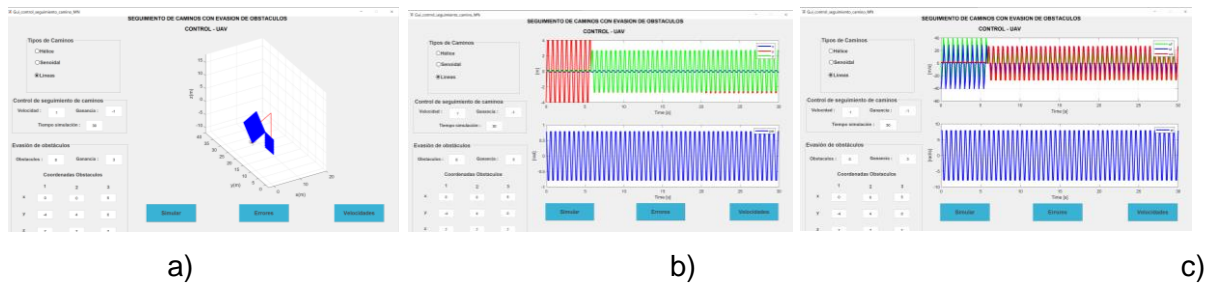




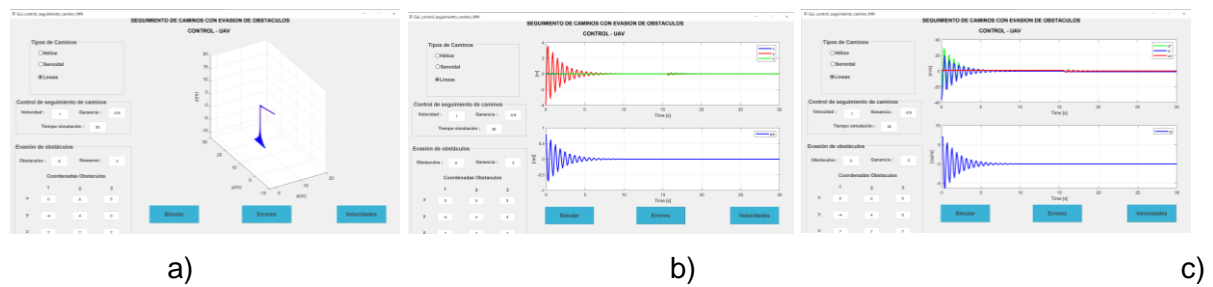
**Figura AV. 13.** Simulación del seguimiento de camino: Líneas, con una ganancia de 0.1 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $W$ .

## ANEXO VI

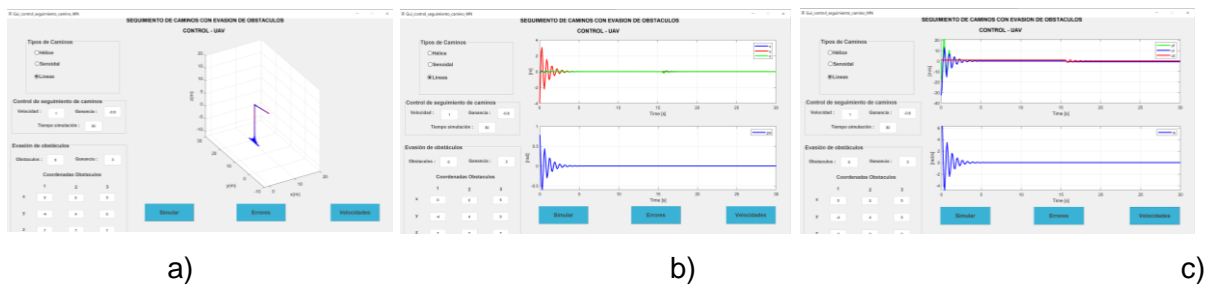
### CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: LÍNEAS, PARA DIFERENTES VALORES DE ÁNGULOS.



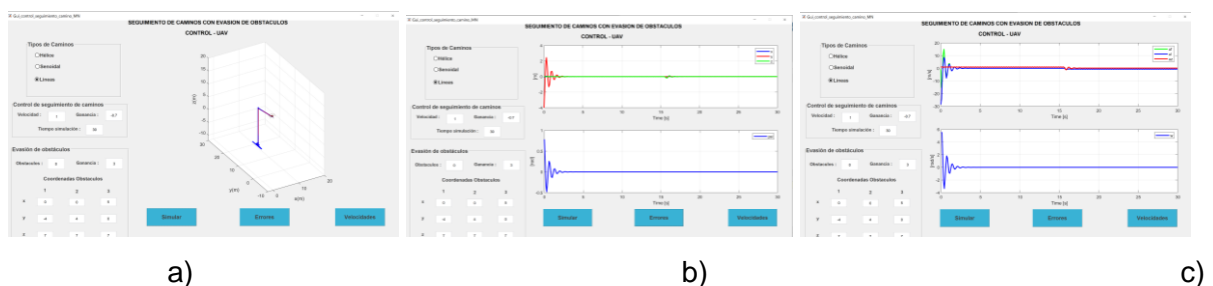
**Figura AVI. 1.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -1$  y ángulo entre líneas mayor a  $270$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



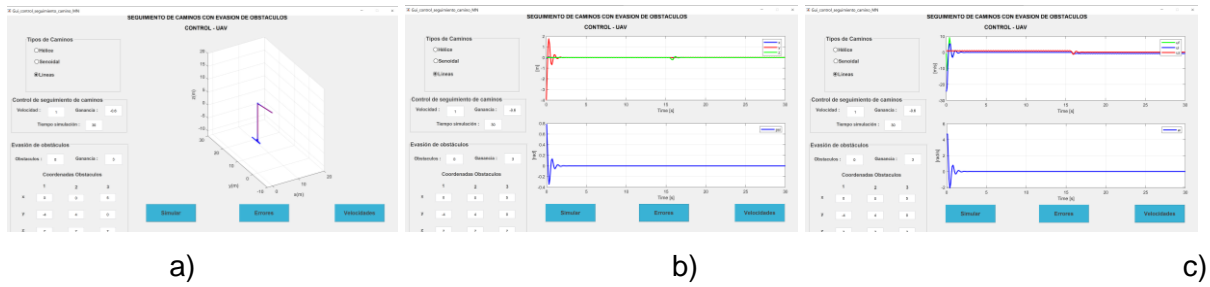
**Figura AVI. 2.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.9$  y ángulo entre líneas menor a  $260.79$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



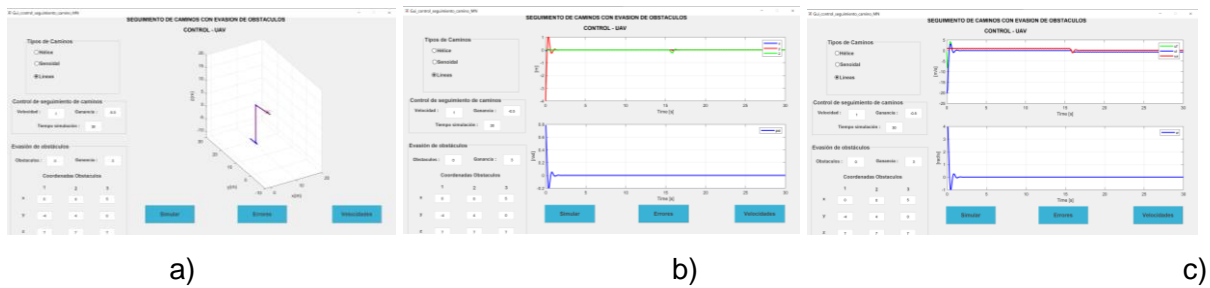
**Figura AVI. 3.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.8$  y ángulo entre líneas menor a  $261.18$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



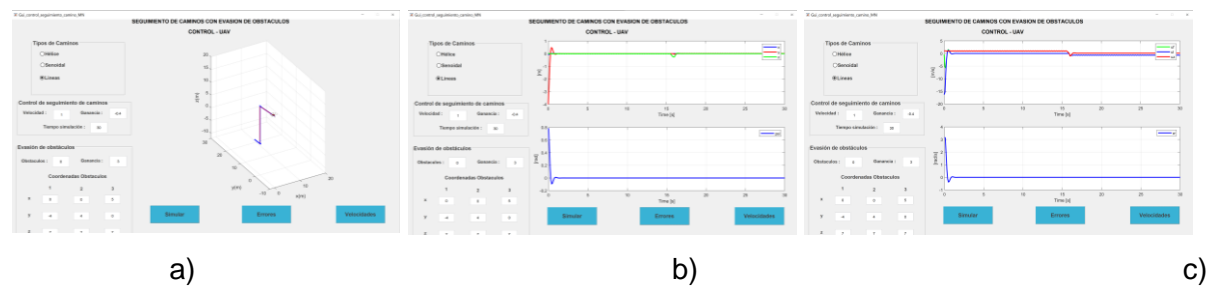
**Figura AVI. 4.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.7$  y ángulo entre líneas menor a  $261.57$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



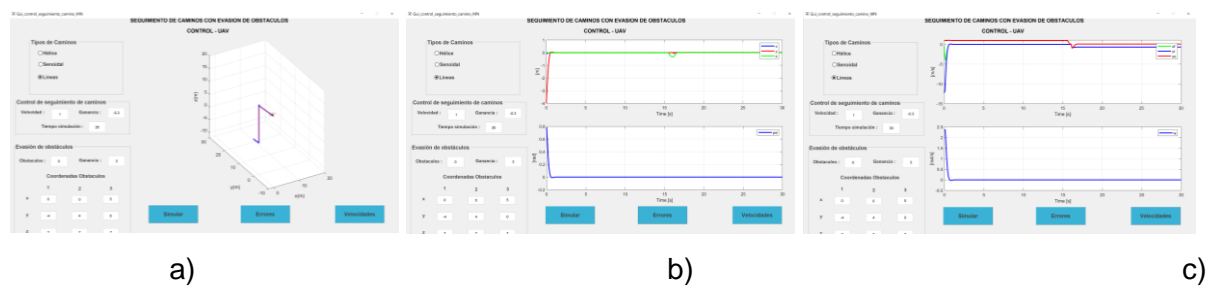
**Figura AVI. 5.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.6$  y ángulo entre líneas menor a  $262.34$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



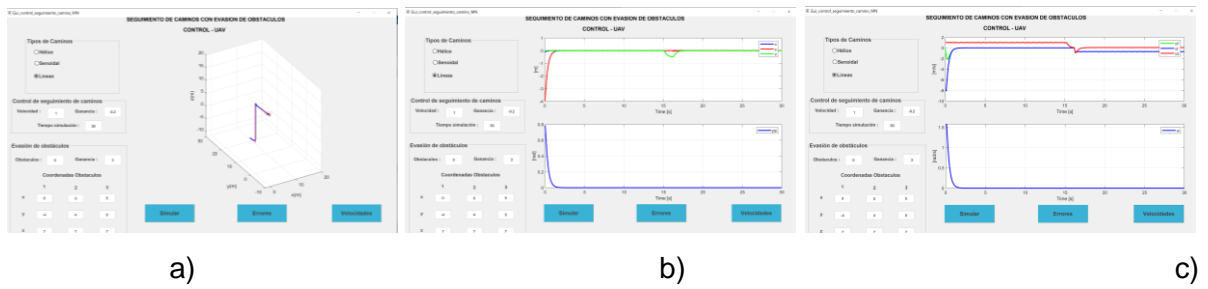
**Figura AVI. 6.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.5$  y ángulo entre líneas menor a  $262.72$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



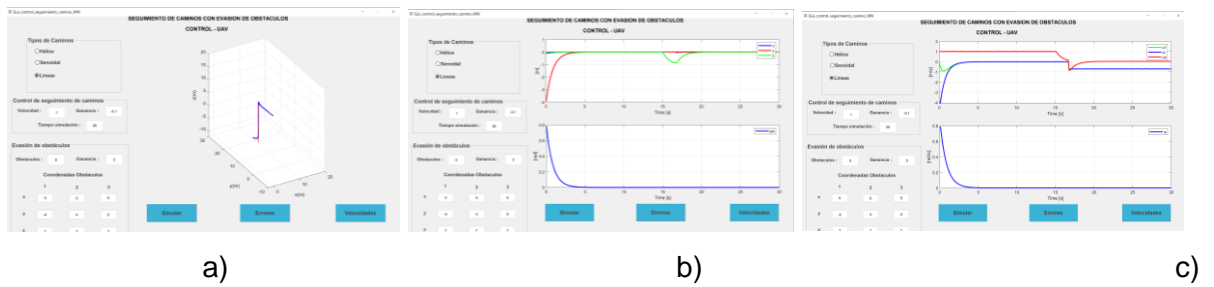
**Figura AVI. 7.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.4$  y ángulo entre líneas menor a  $263.88$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



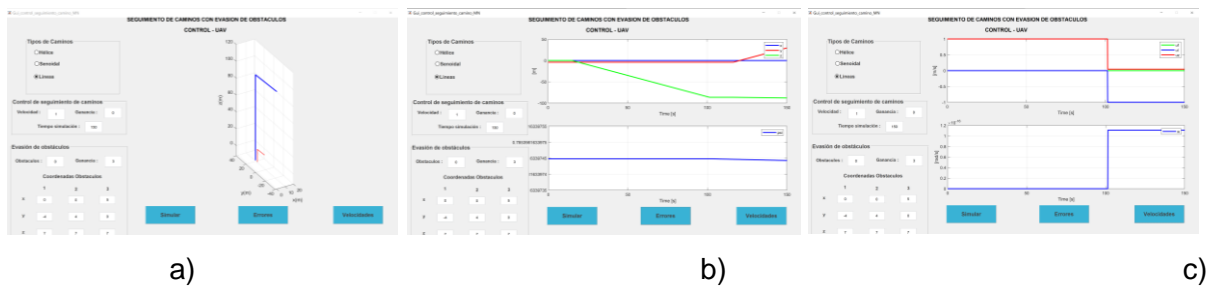
**Figura AVI. 8.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.3$  y ángulo entre líneas menor a  $265.03$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de  $x, y, z$  e  $W$ .



**Figura AVI. 9.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.2$  y ángulo entre líneas menor a  $266.56$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



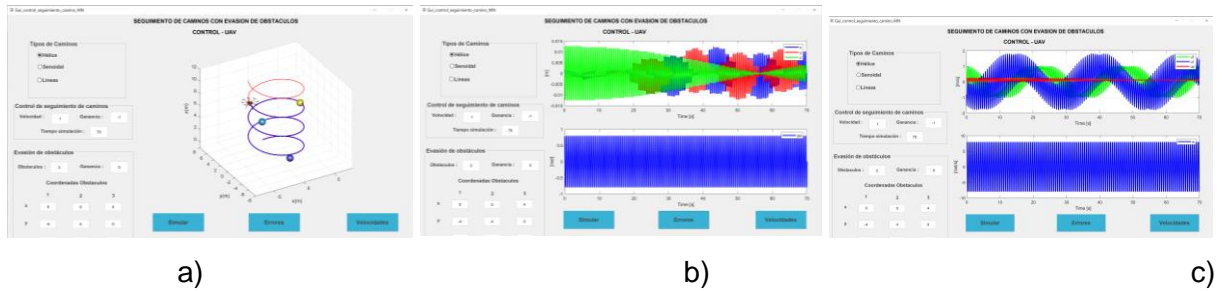
**Figura AVI. 10.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = -0.1$  y ángulo entre líneas menor a  $268.09$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



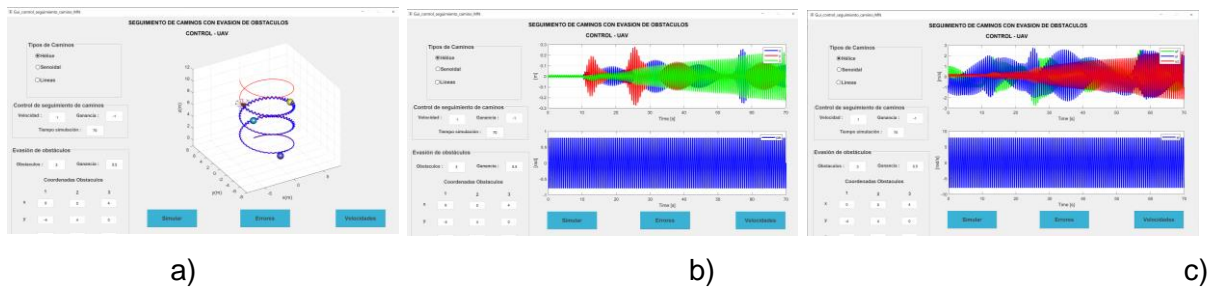
**Figura AVI. 11.** Control de seguimiento de camino Líneas para  $W = 0$  y ángulo entre líneas menor a  $267.33$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

## ANEXO VII

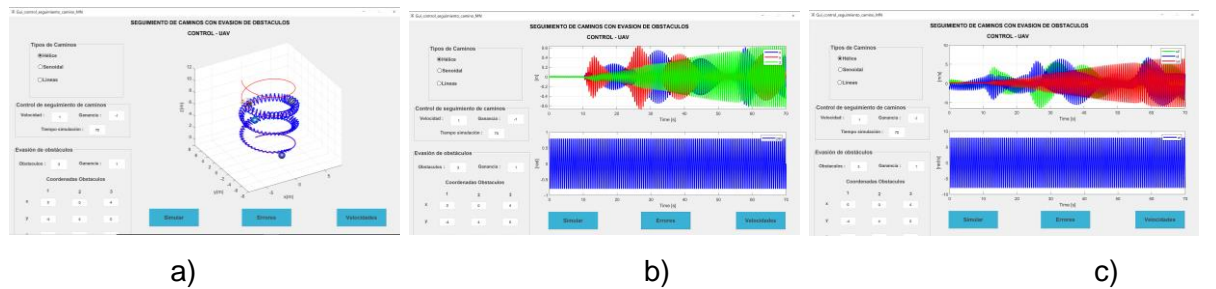
### RESPUESTA DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: HÉLICE CON 3 OBSTÁCULOS



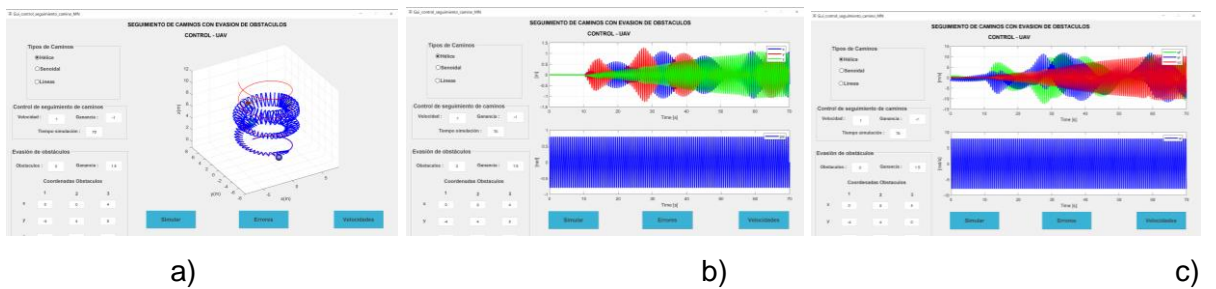
**Figura AVII. 1.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



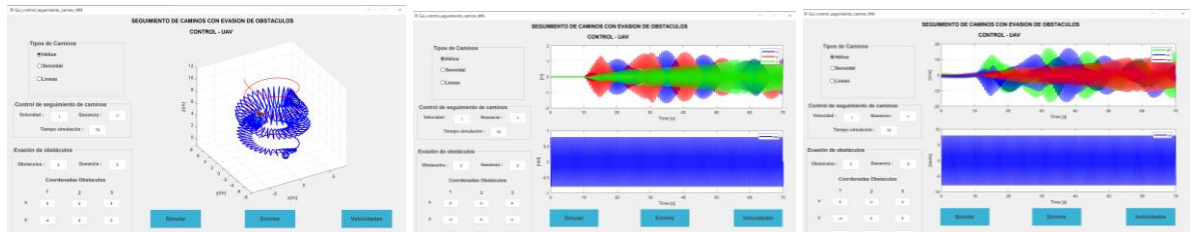
**Figura AVII. 2.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 0.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 3.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

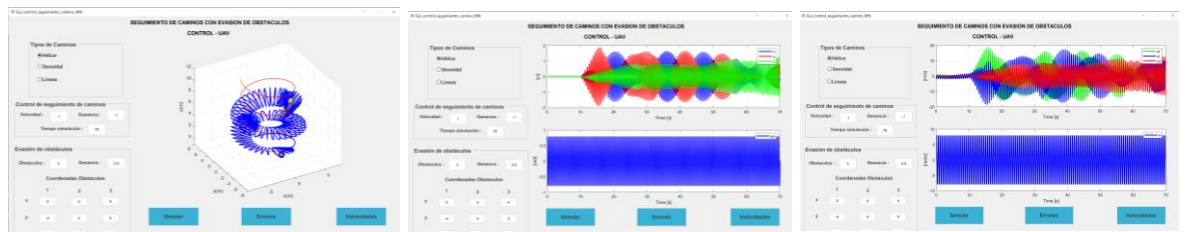


**Figura AVII. 4.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 1.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



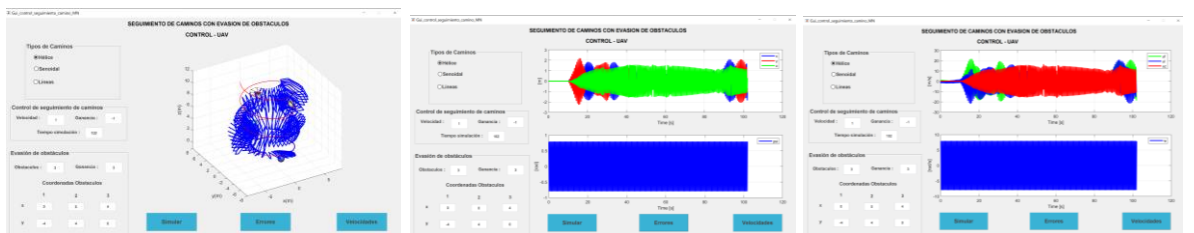
a) b) c)

**Figura AVII. 5.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 2 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



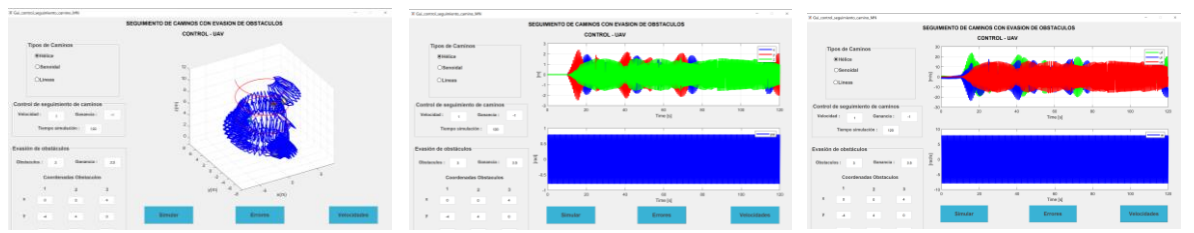
a) b) c)

**Figura AVII. 6.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 2.5 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



a) b) c)

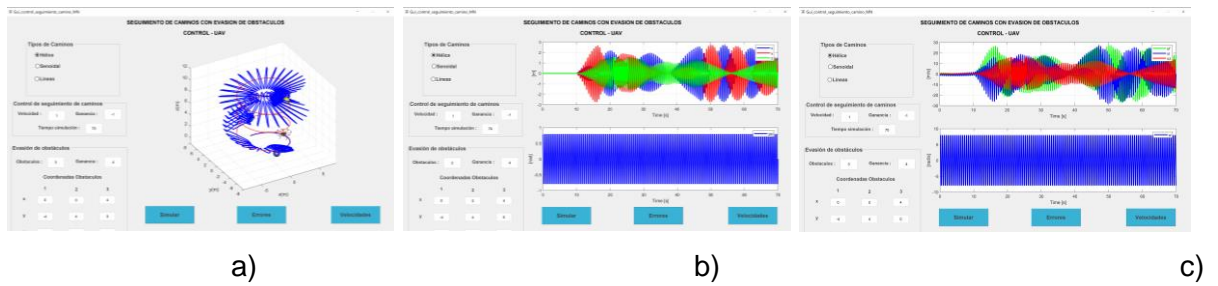
**Figura AVII. 7.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 3 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



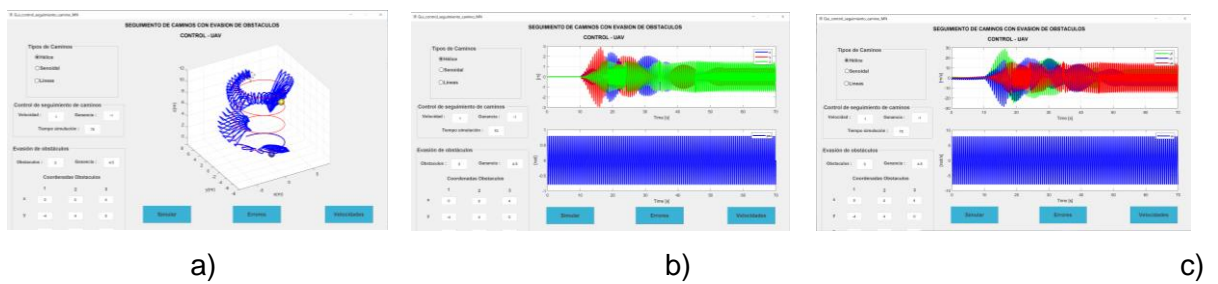
a) b) c)

**Figura AVII. 8.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 3.5 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

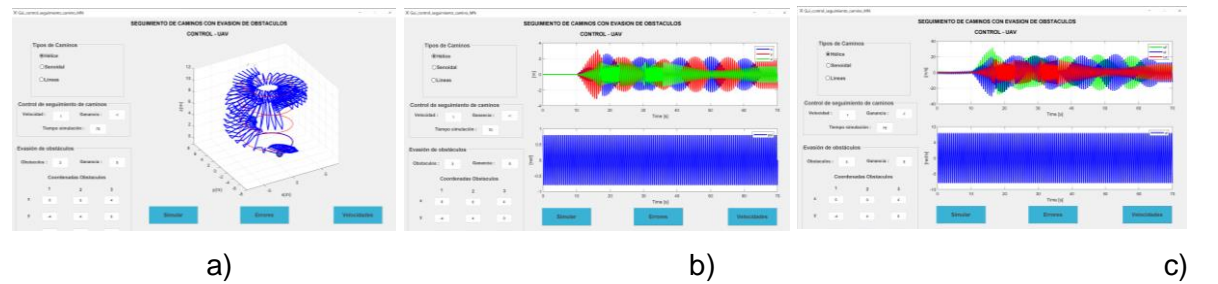




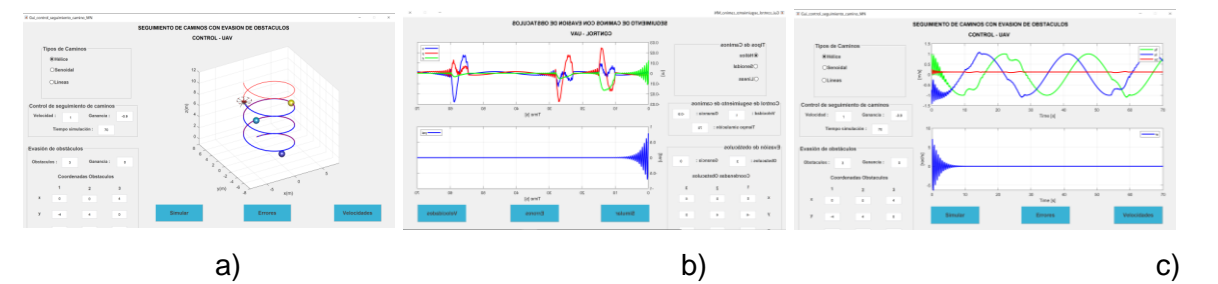
**Figura AVII. 9.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 4 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



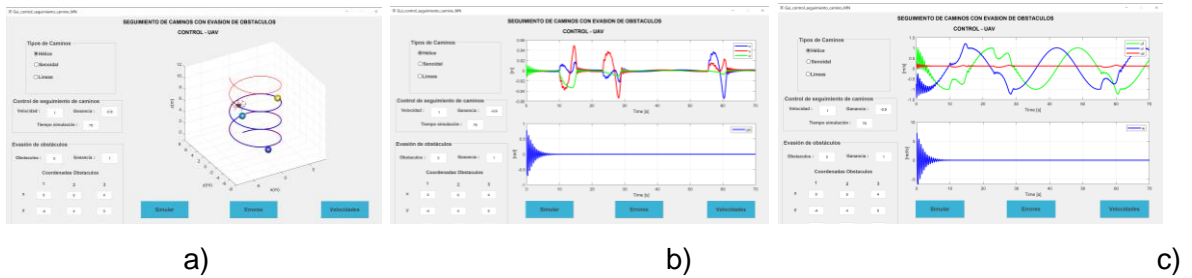
**Figura AVII. 10.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 4.5 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



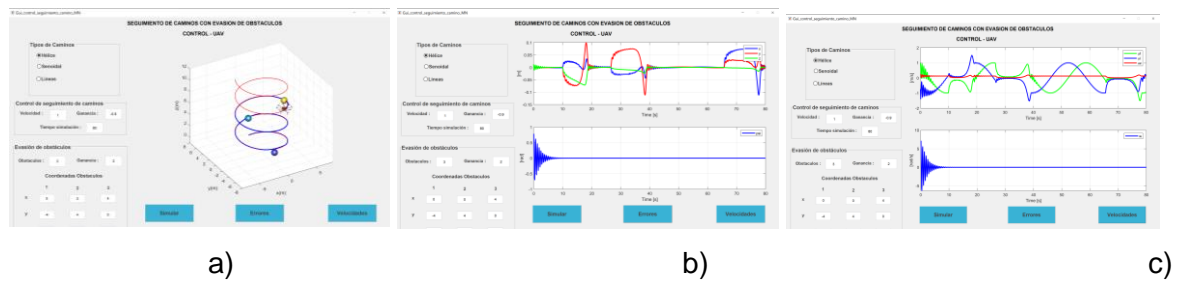
**Figura AVII. 11.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y *Ganancia* = 5 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



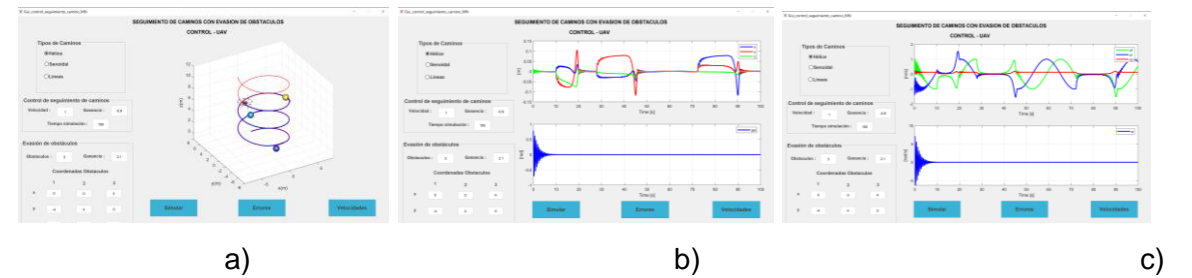
**Figura AVII. 12.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y *Ganancia* = 0 a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



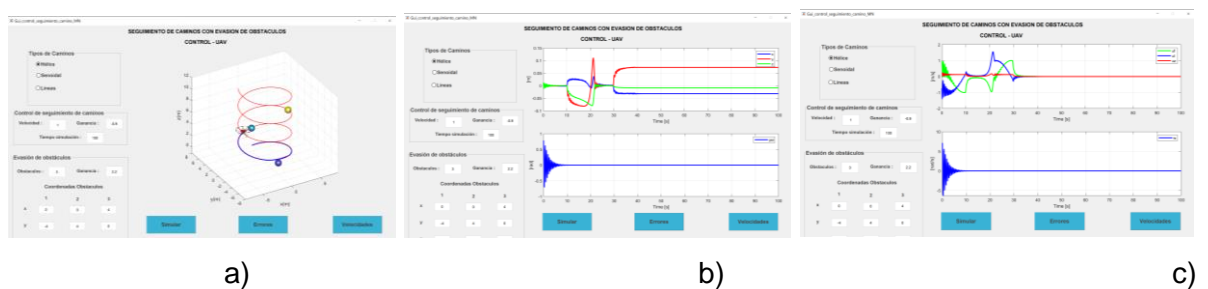
**Figura AVII. 13.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



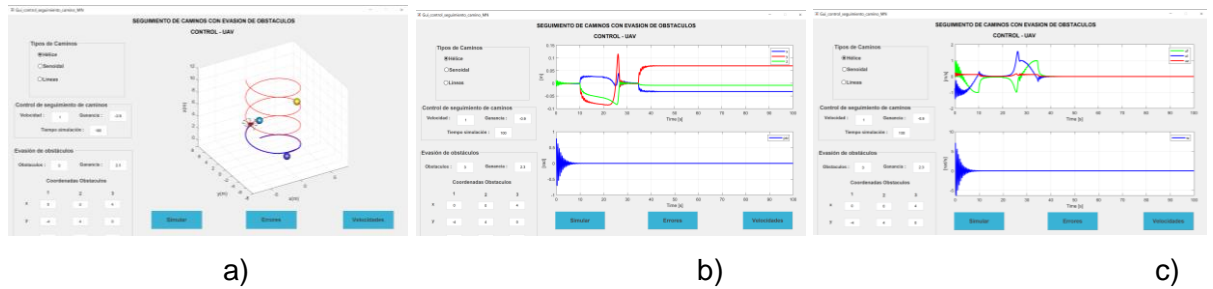
**Figura AVII. 14.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



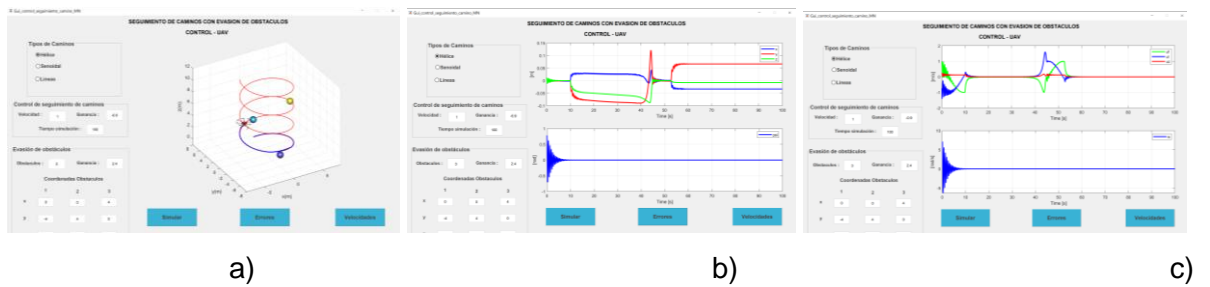
**Figura AVII. 15.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



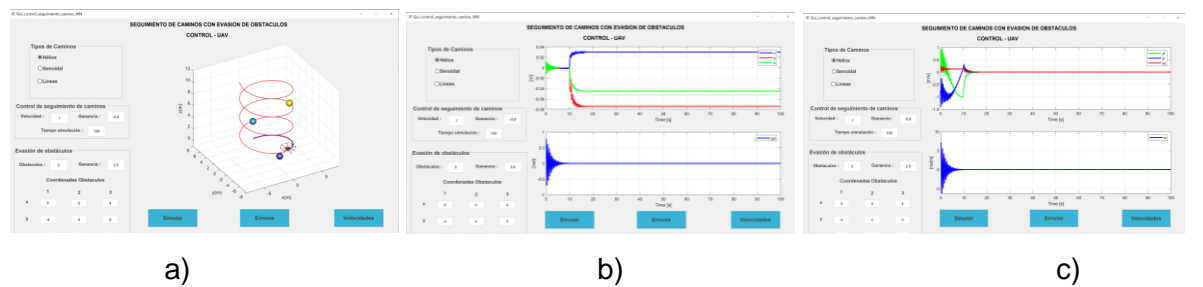
**Figura AVII. 16.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



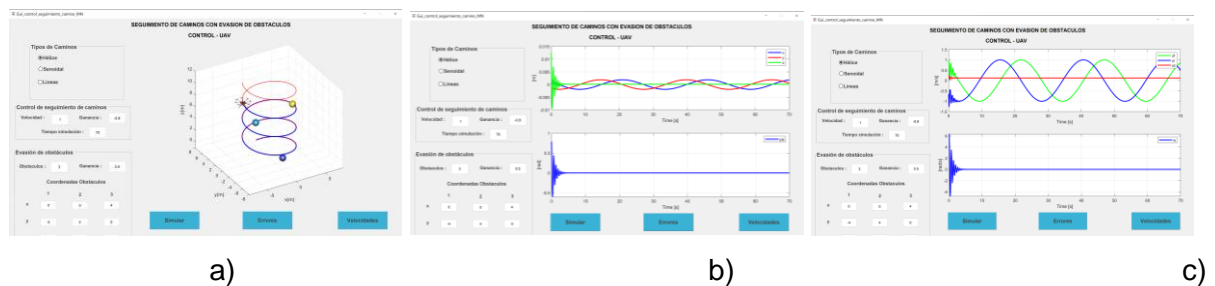
**Figura AVII. 17.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



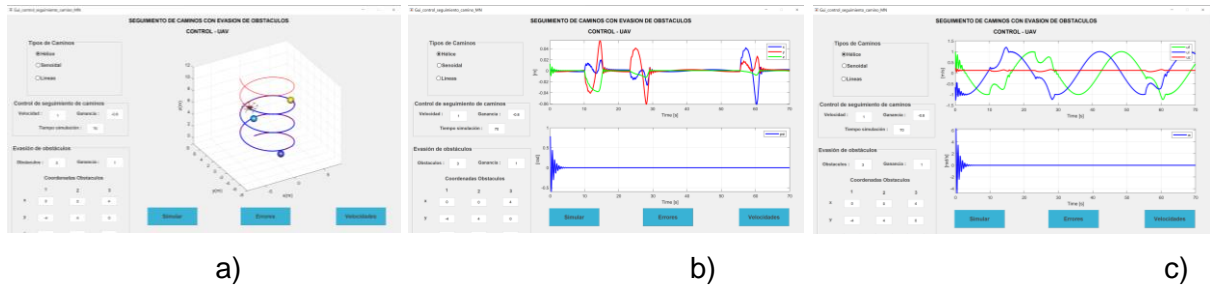
**Figura AVII. 18.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



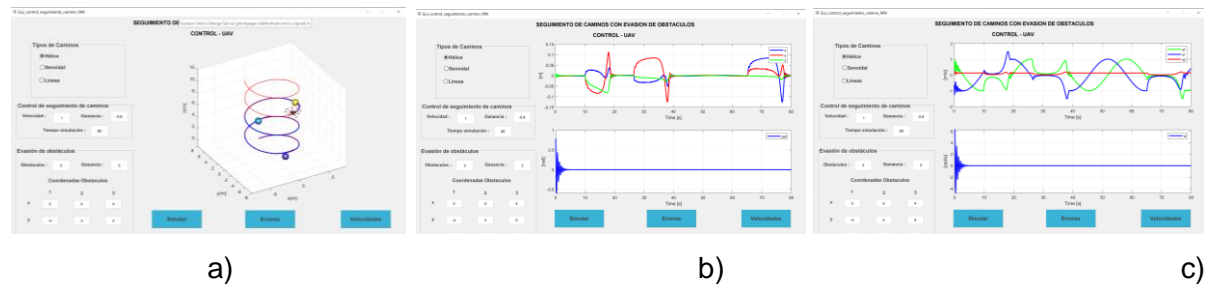
**Figura AVII. 19.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



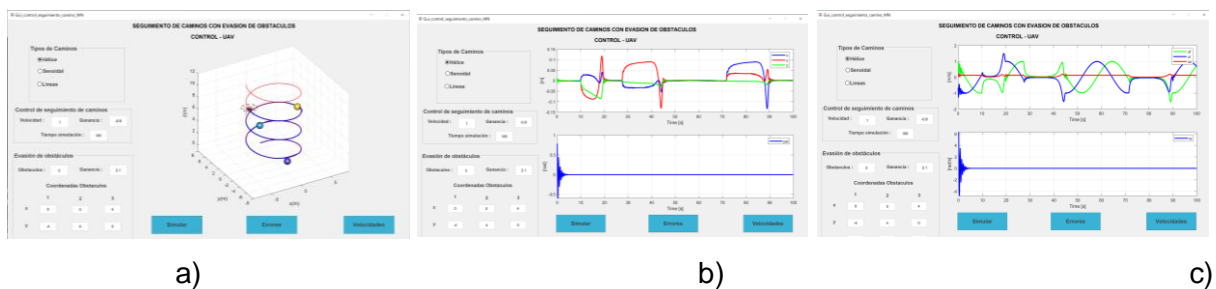
**Figura AVII. 20.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 0.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



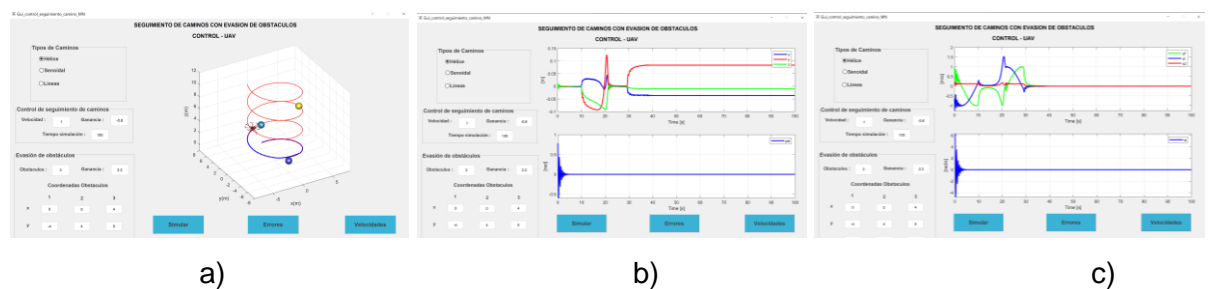
**Figura AVII. 21.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



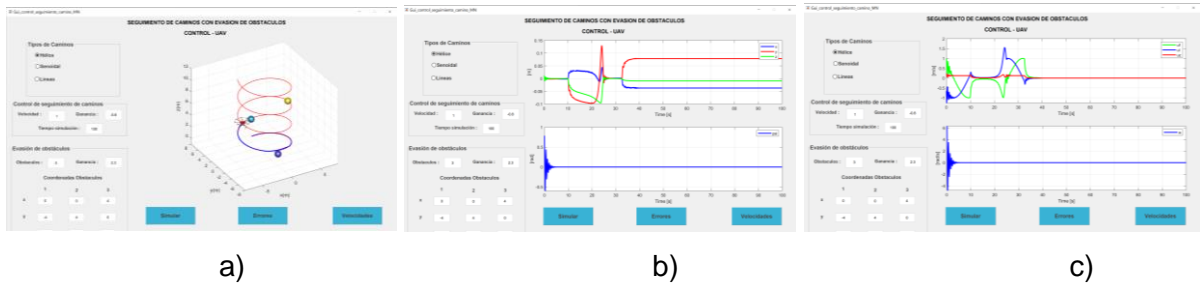
**Figura AVII. 22.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



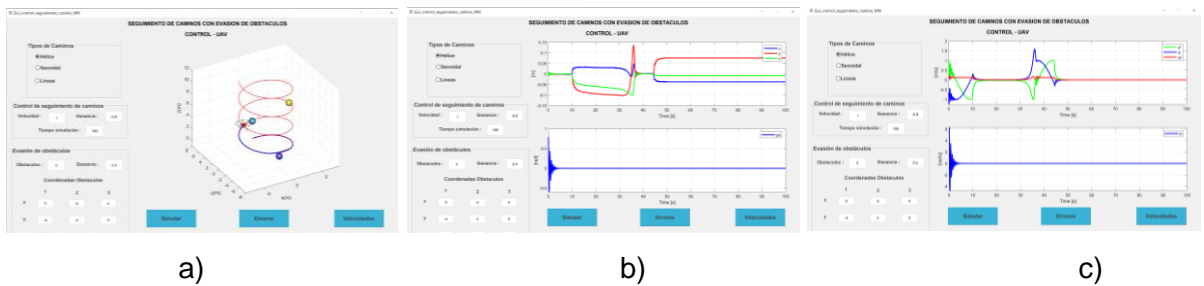
**Figura AVII. 23.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



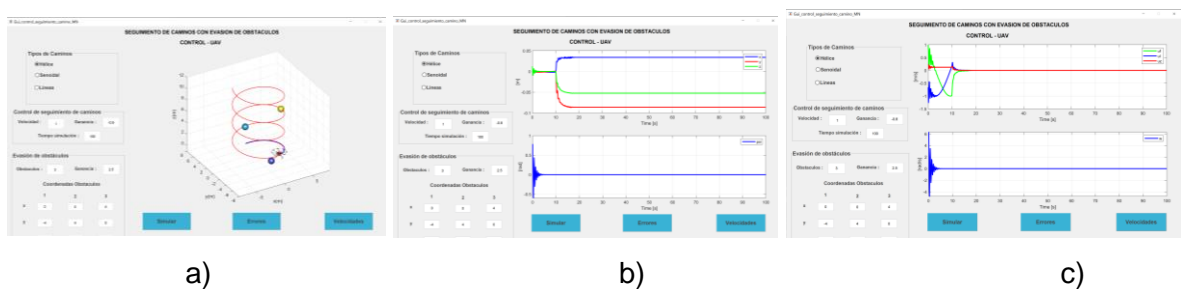
**Figura AVII. 24.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



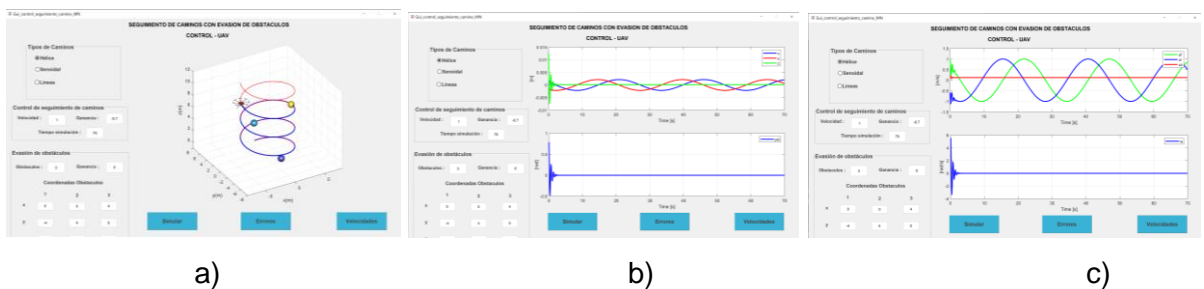
**Figura AVII. 25.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



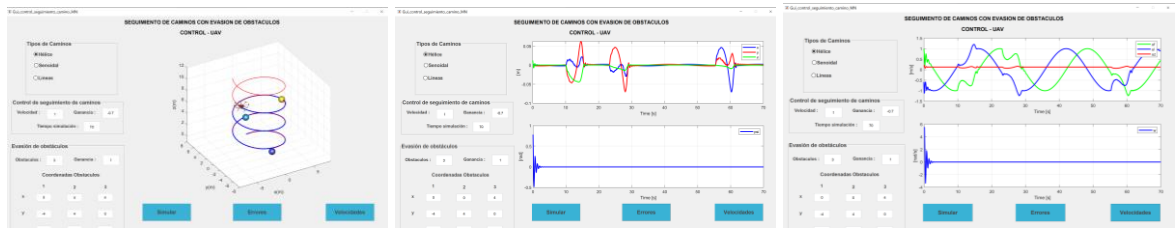
**Figura AVII. 26.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 27.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 28.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

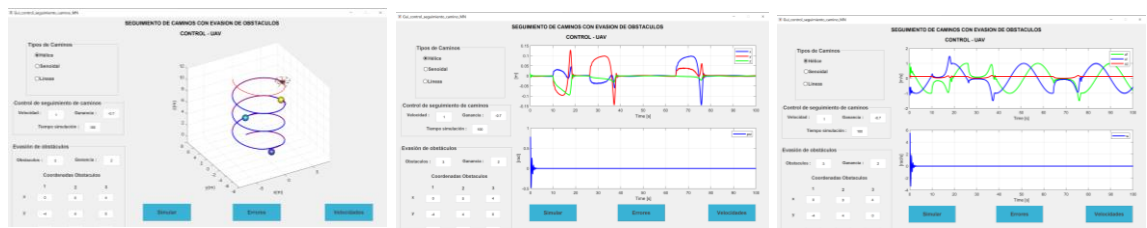


a)

b)

c)

**Figura AVII. 29.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

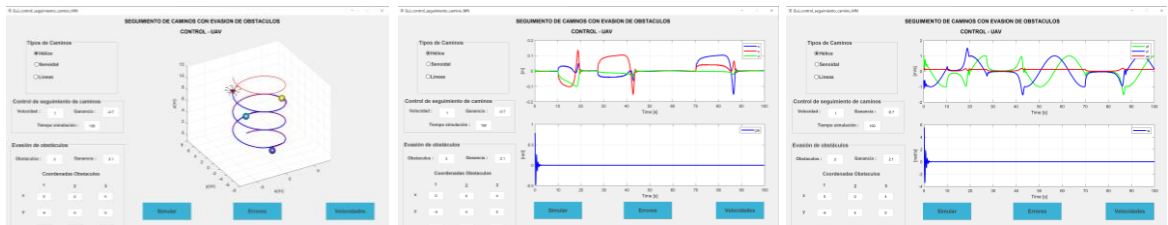


a)

b)

c)

**Figura AVII. 30.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

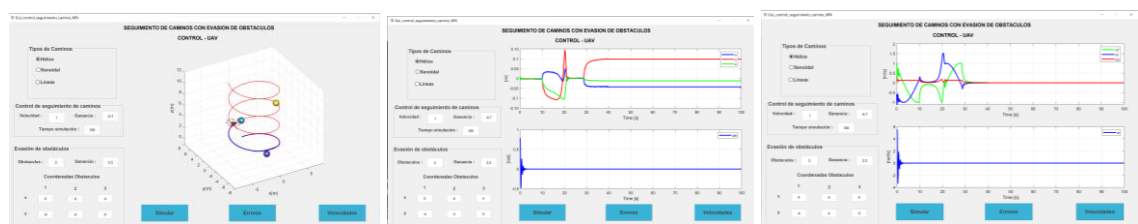


a)

b)

c)

**Figura AVII. 31.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

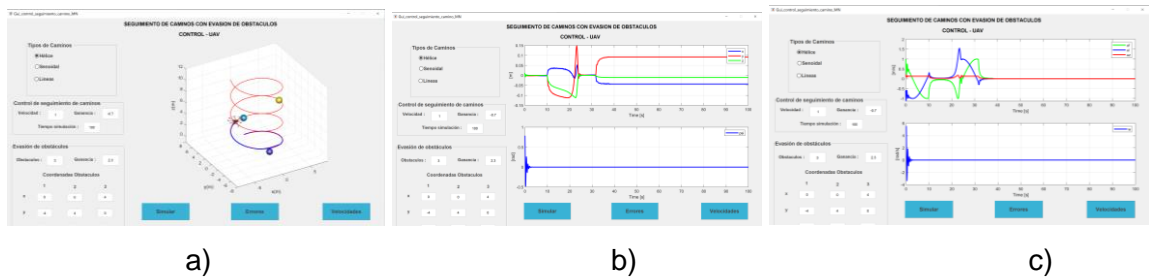


a)

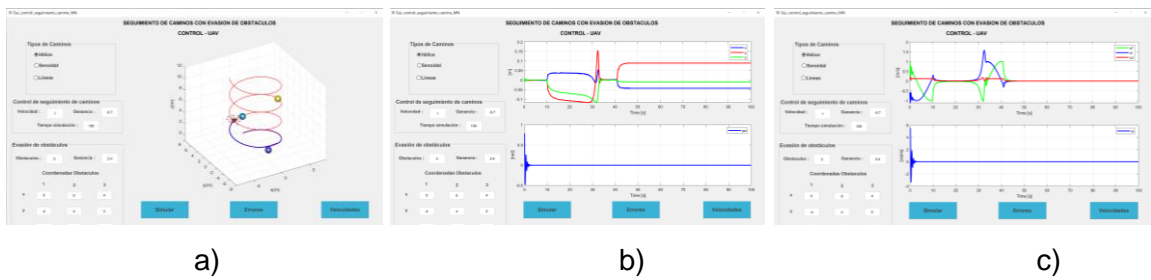
b)

c)

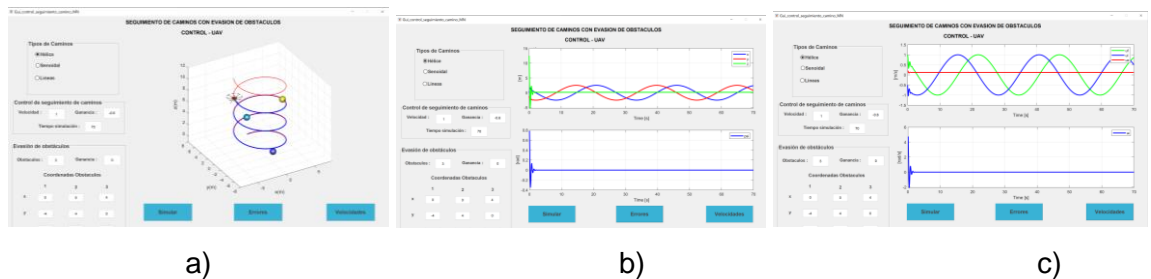
**Figura AVII. 32.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



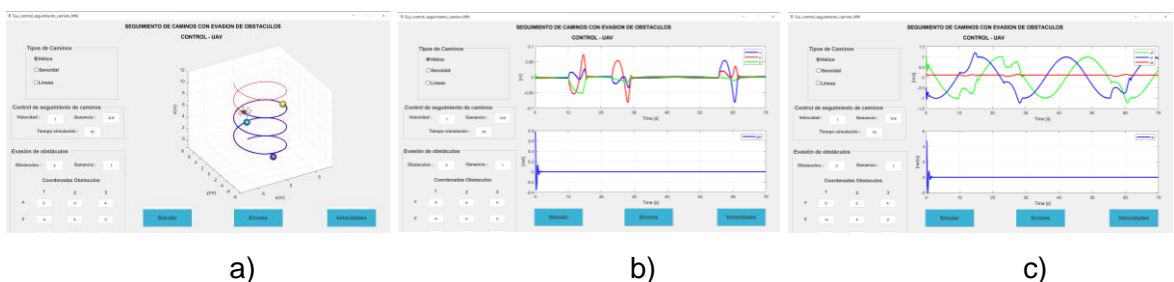
**Figura AVII. 33.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



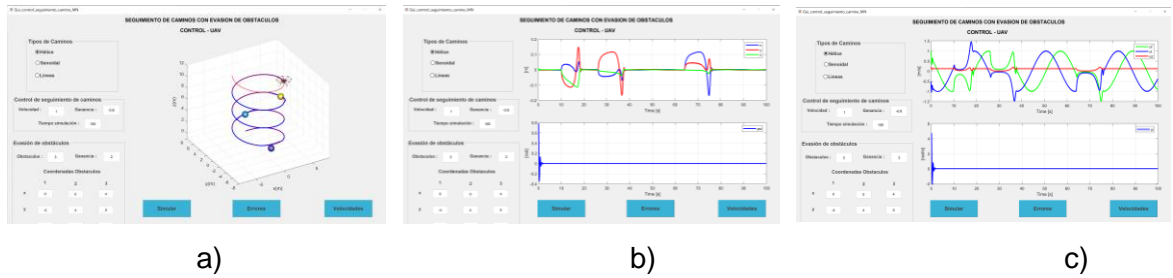
**Figura AVII. 34.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



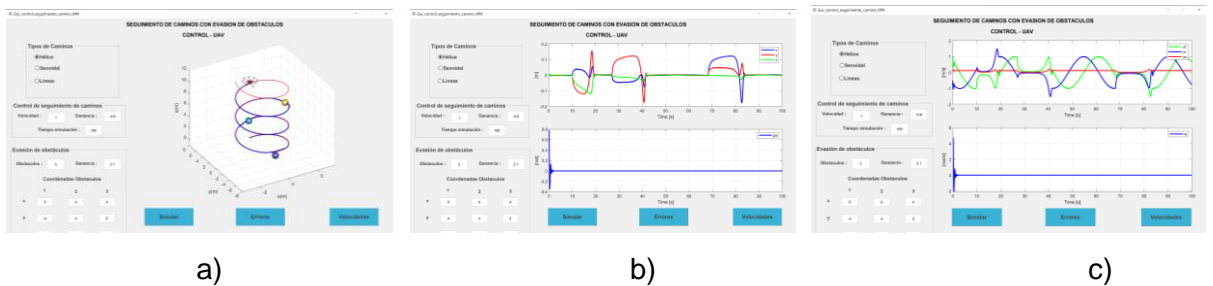
**Figura AVII. 35.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



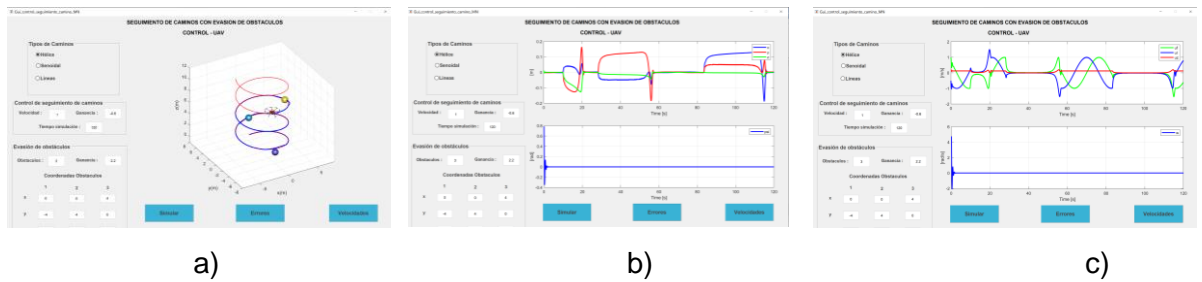
**Figura AVII. 36.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



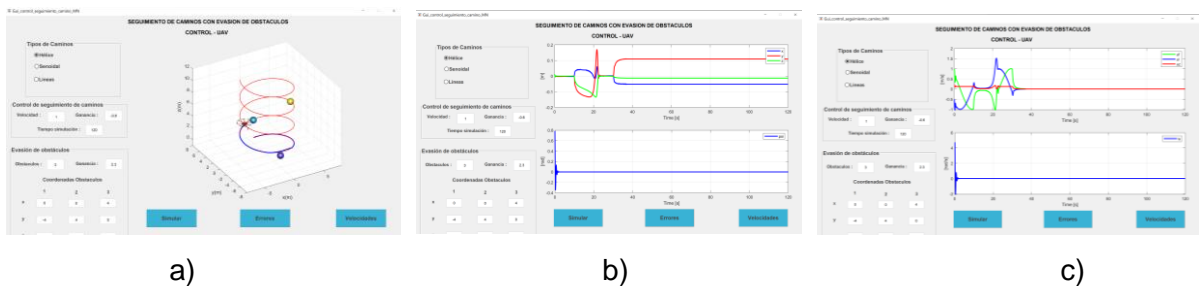
**Figura AVII. 37.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 38.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

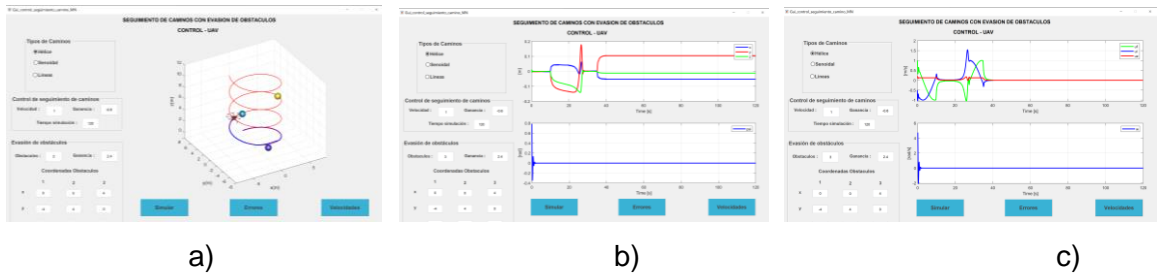


**Figura AVII. 39.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

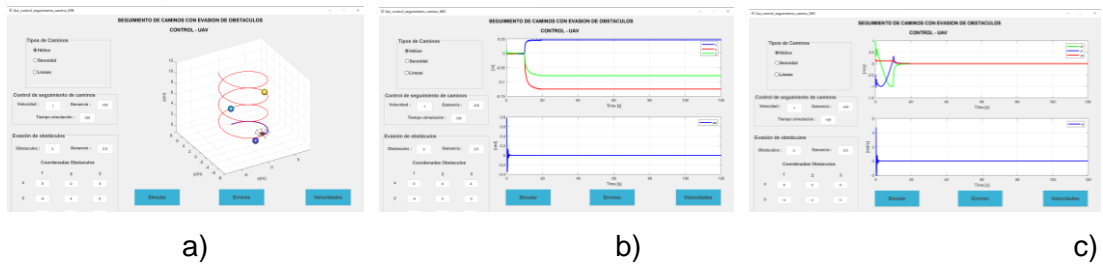


**Figura AVII. 40.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

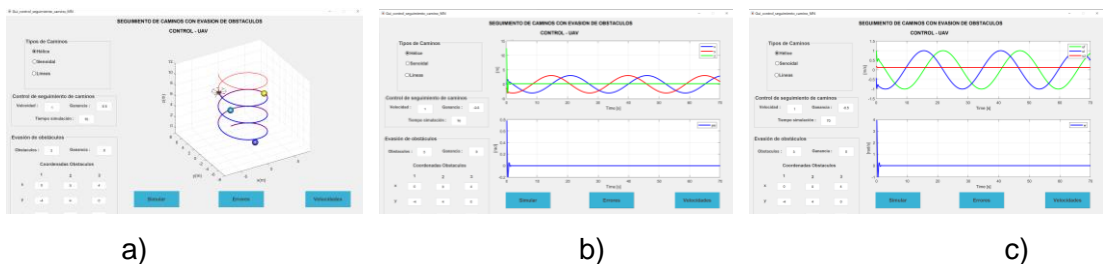




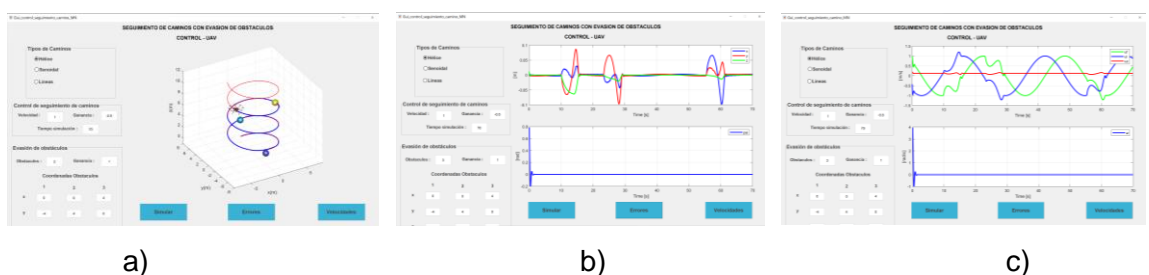
**Figura AVII. 41.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



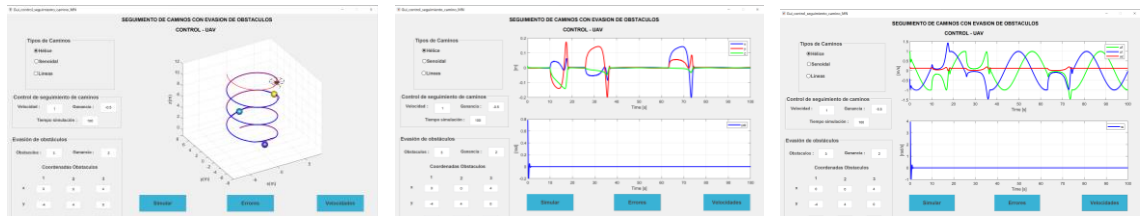
**Figura AVII. 42.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 43.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

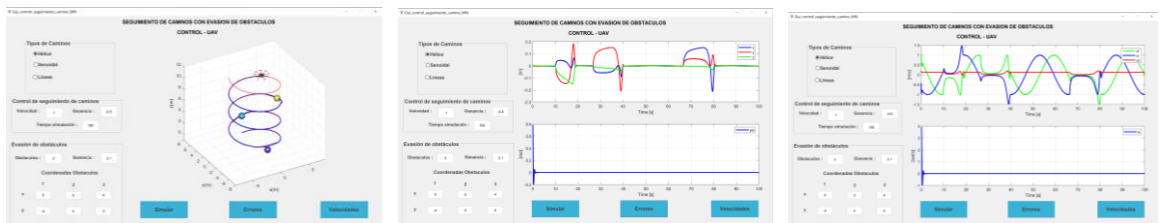


**Figura AVII. 44.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



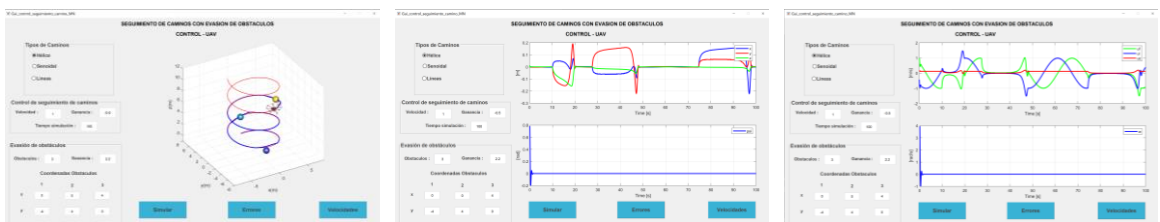
a) b) c)

**Figura AVII. 45.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



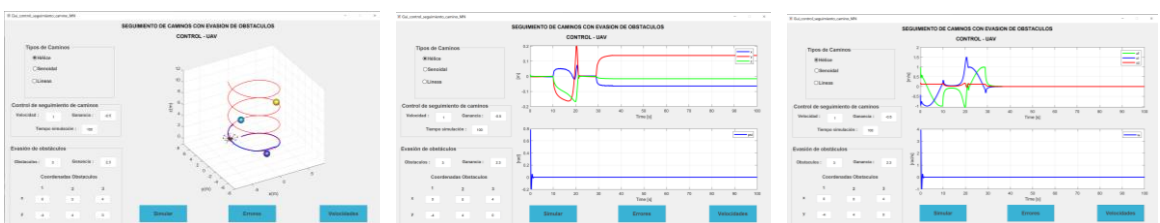
a) b) c)

**Figura AVII. 46.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



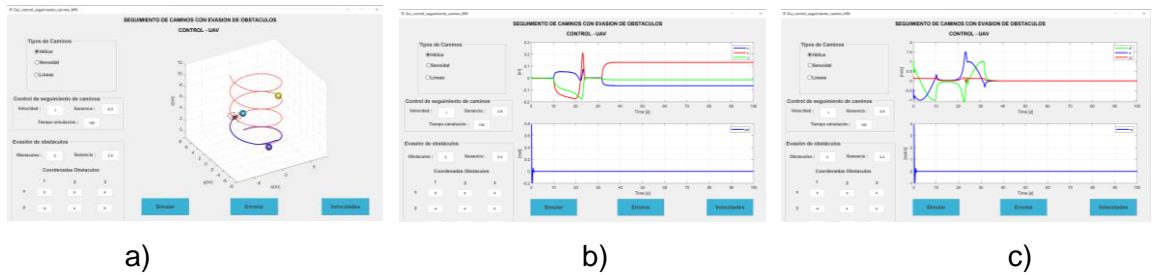
a) b) c)

**Figura AVII. 47.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

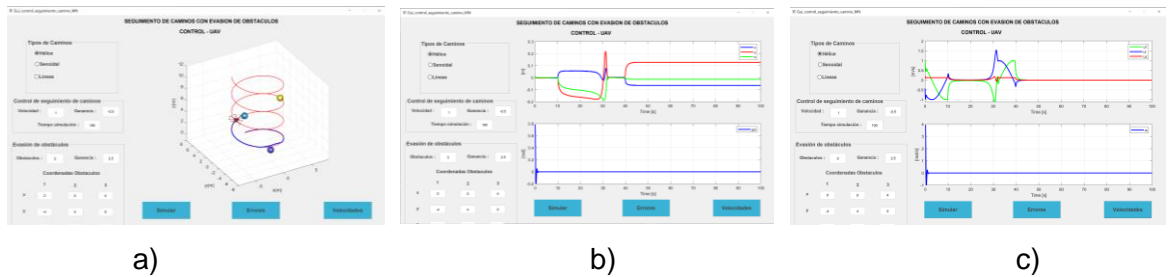


a) b) c)

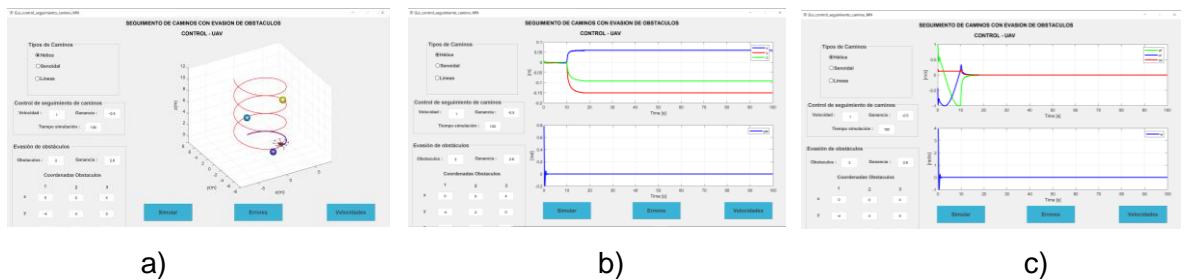
**Figura AVII. 48.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



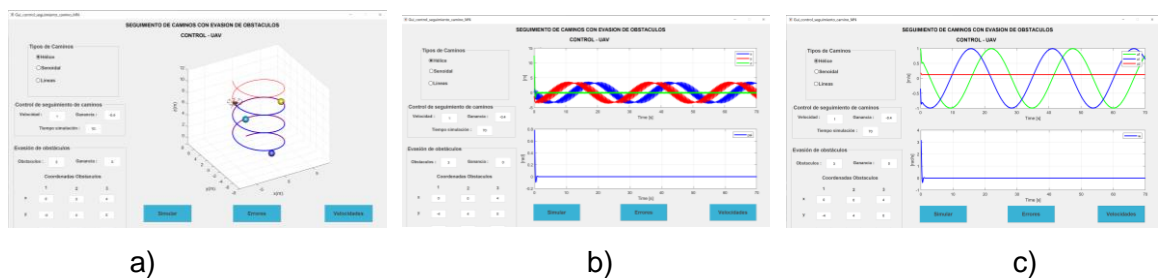
**Figura AVII. 49.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



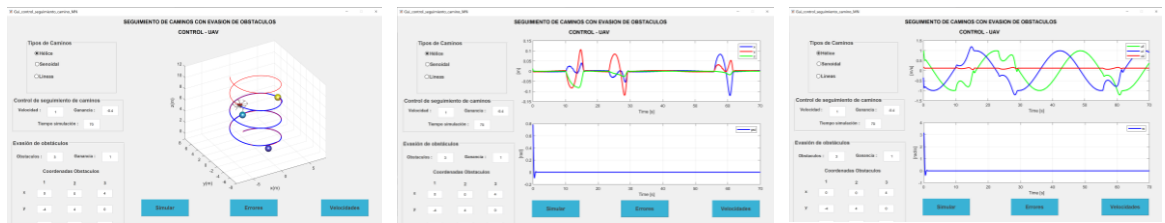
**Figura AVII. 50.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 51.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.6$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

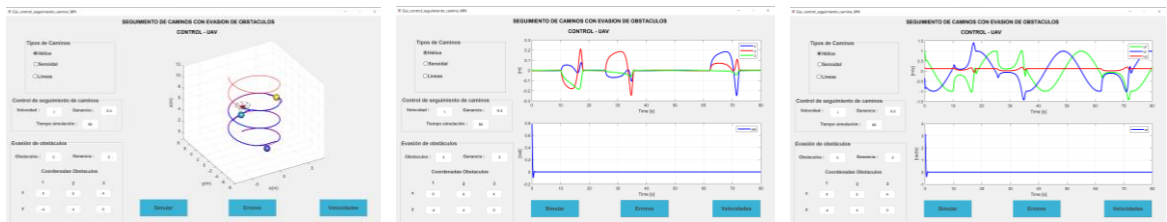


**Figura AVII. 52.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



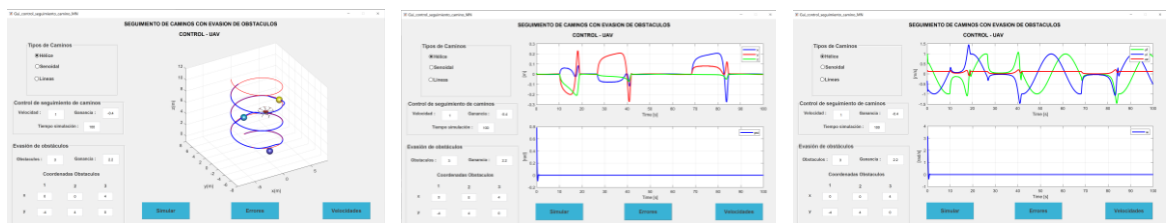
a) b) c)

**Figura AVII. 53.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



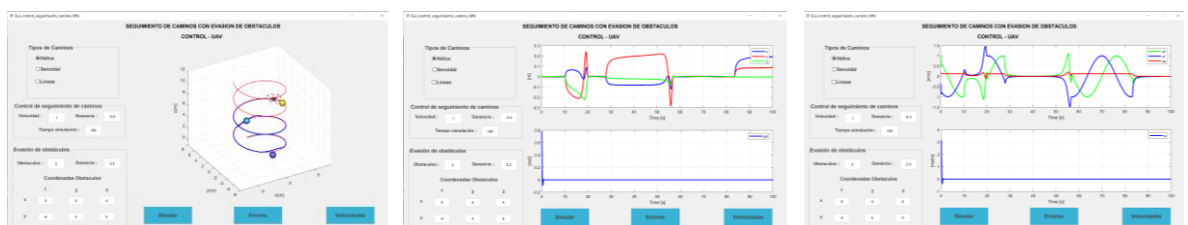
a) b) c)

**Figura AVII. 54.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



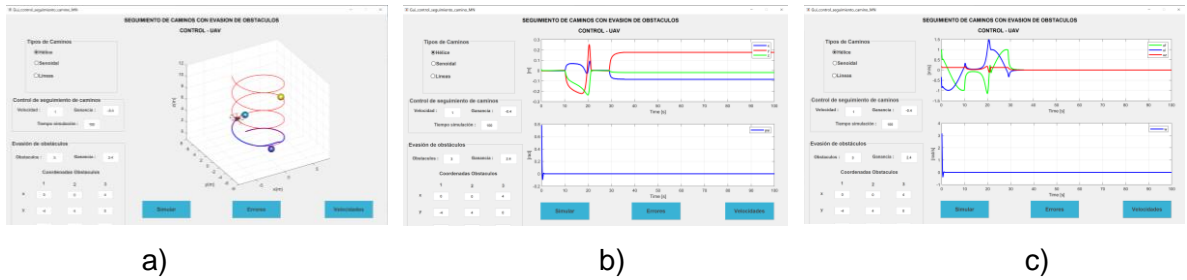
a) b) c)

**Figura AVII. 55.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

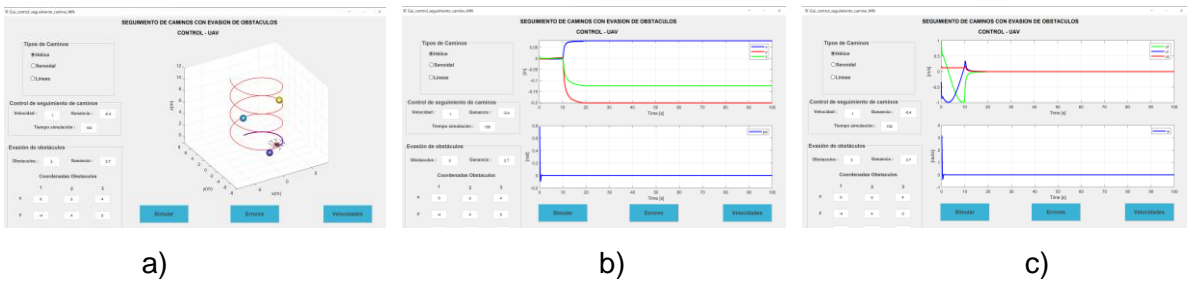


a) b) c)

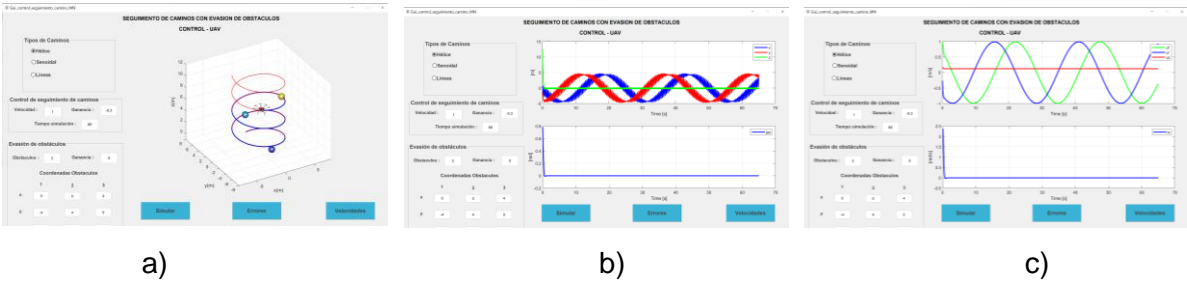
**Figura AVII. 56.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



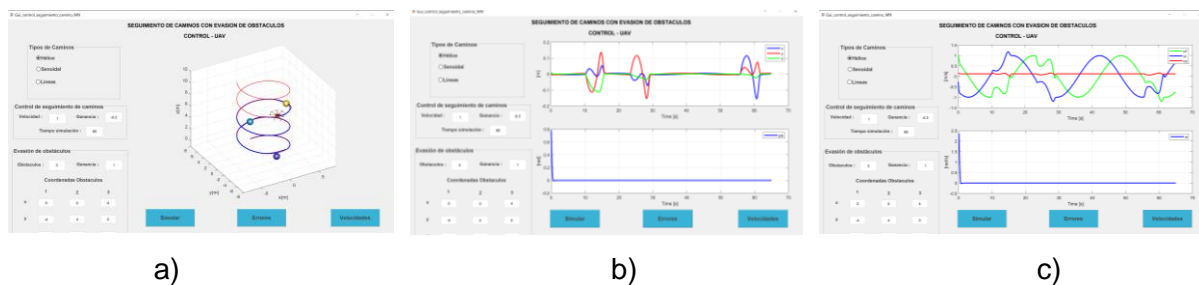
**Figura AVII. 57.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



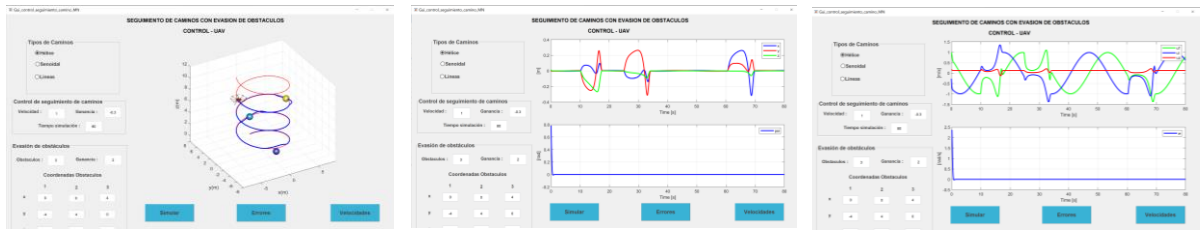
**Figura AVII. 58.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 59.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 60.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

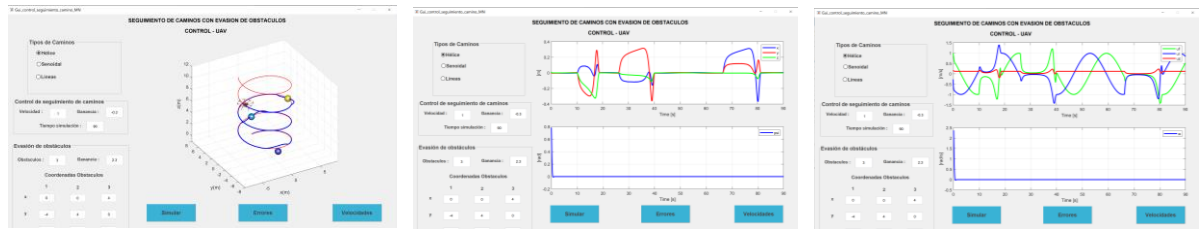


a)

b)

c)

**Figura AVII. 61.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

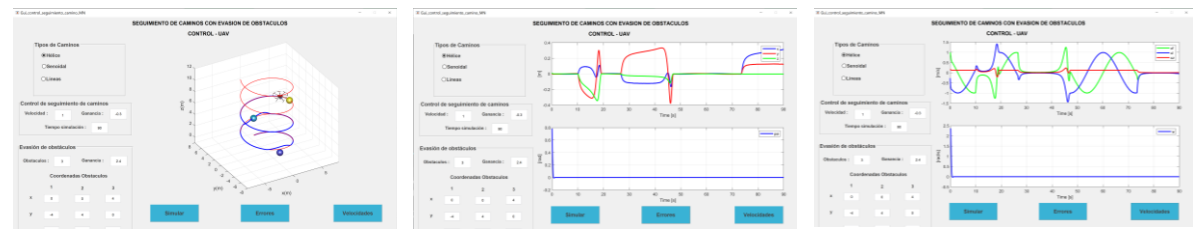


a)

b)

c)

**Figura AVII. 62.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

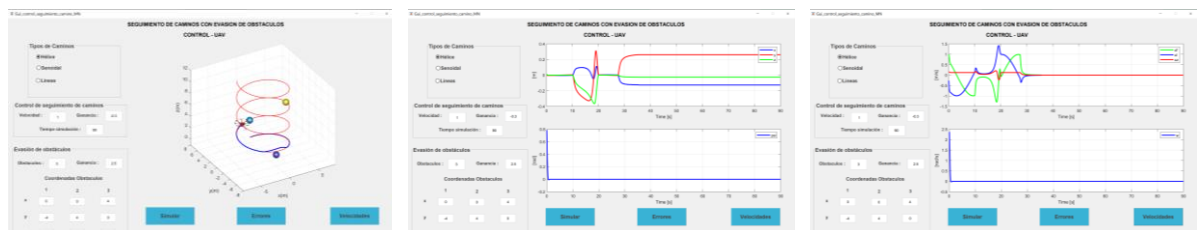


a)

b)

c)

**Figura AVII. 63.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

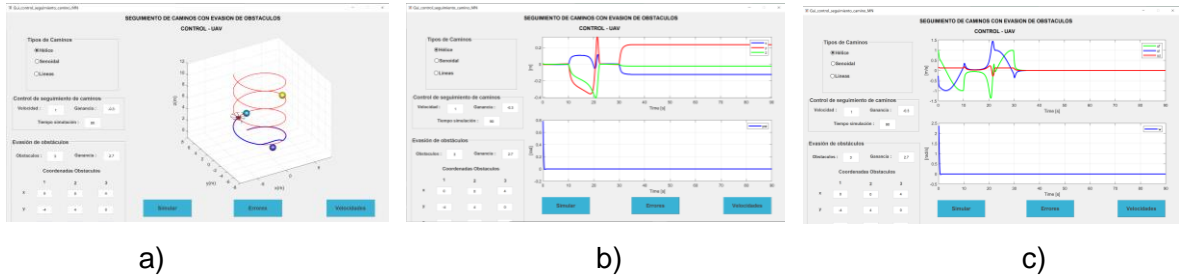


a)

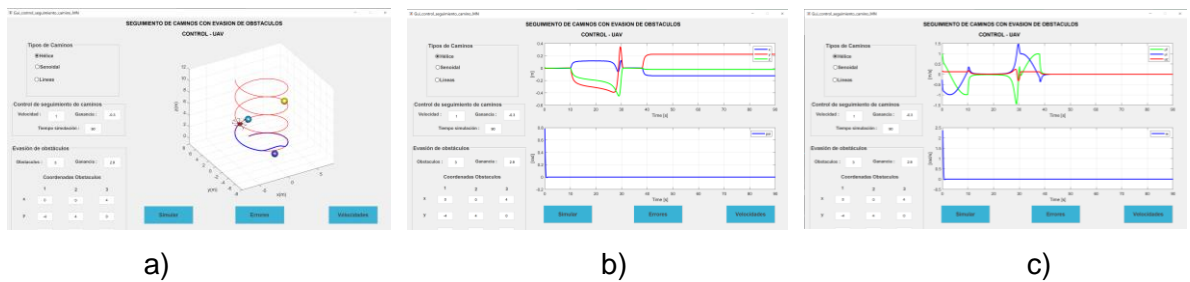
b)

c)

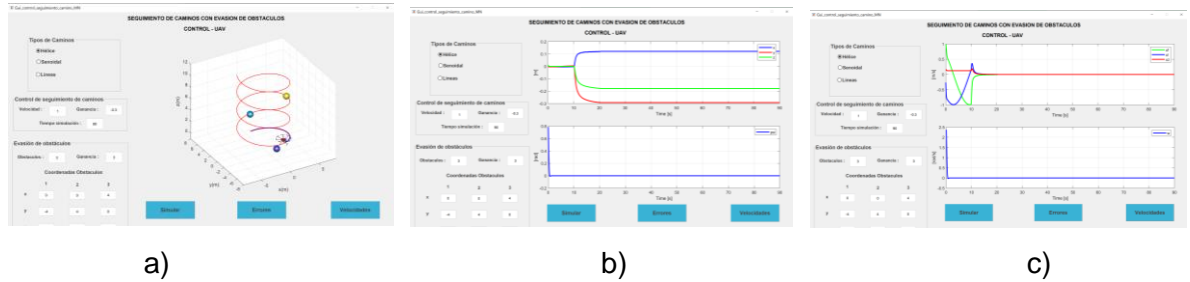
**Figura AVII. 64.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



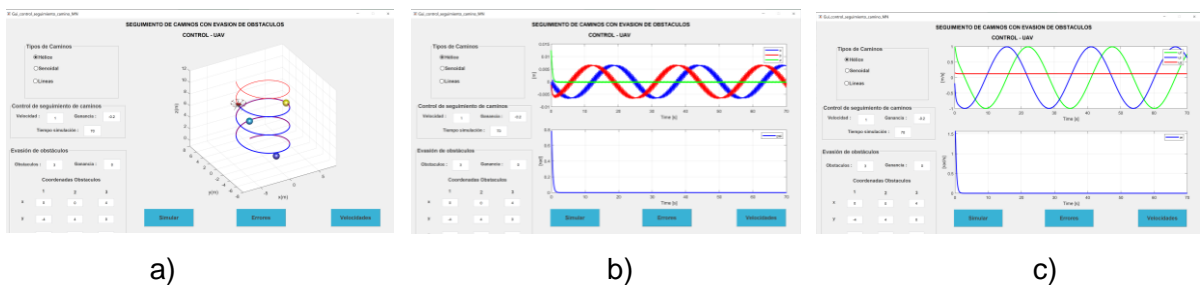
**Figura AVII. 65.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



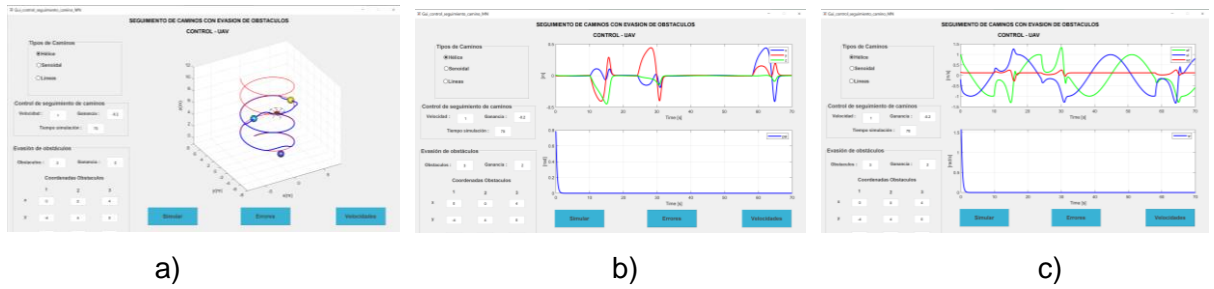
**Figura AVII. 66.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.9$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



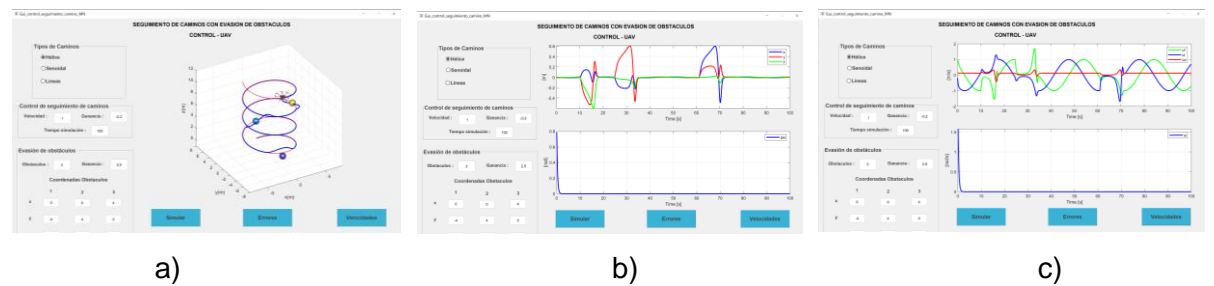
**Figura AVII. 67.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



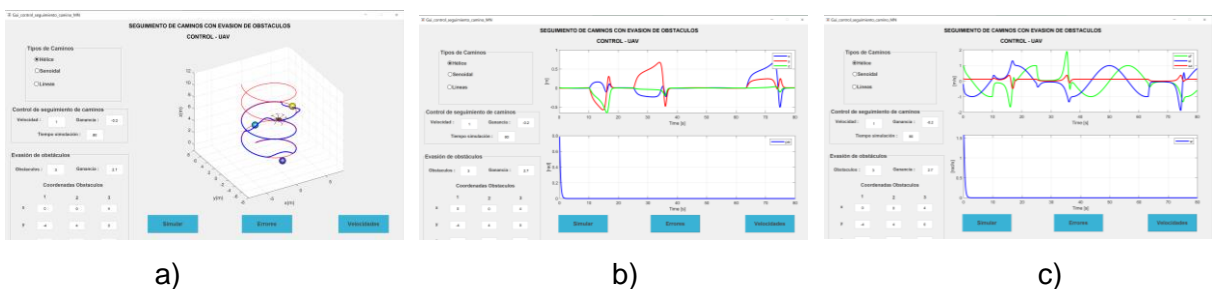
**Figura AVII. 68.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



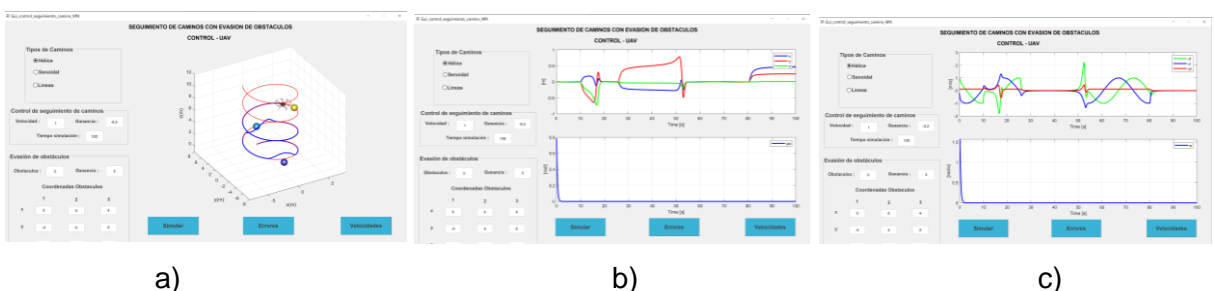
**Figura AVII. 69.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 70.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

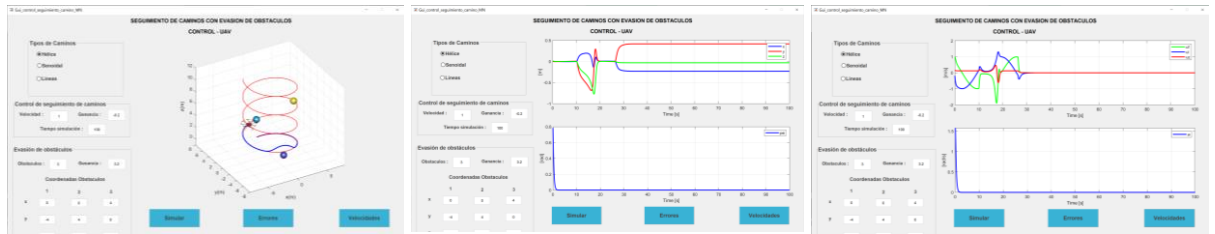


**Figura AVII. 71.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 72.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



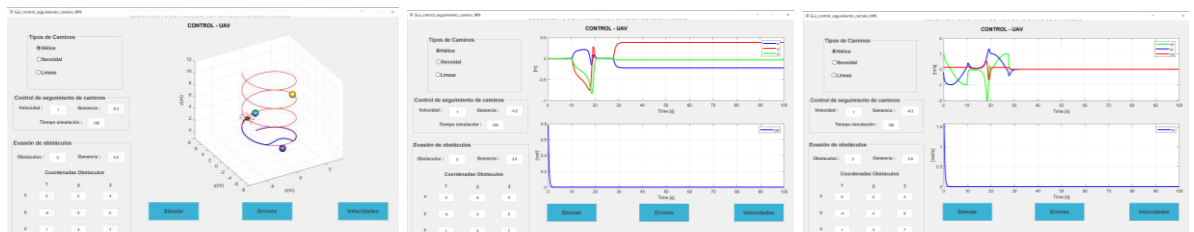


a)

b)

c)

**Figura AVII. 73.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 3.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

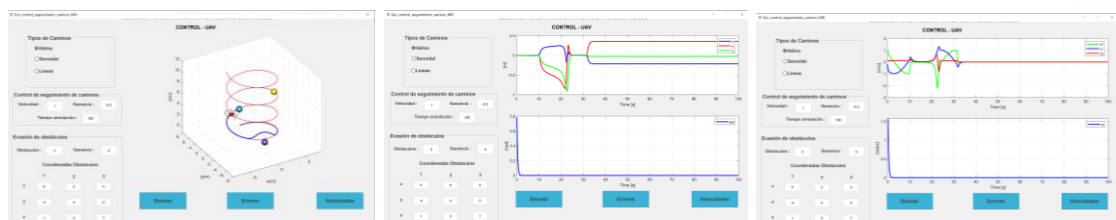


a)

b)

c)

**Figura AVII. 74.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 3.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

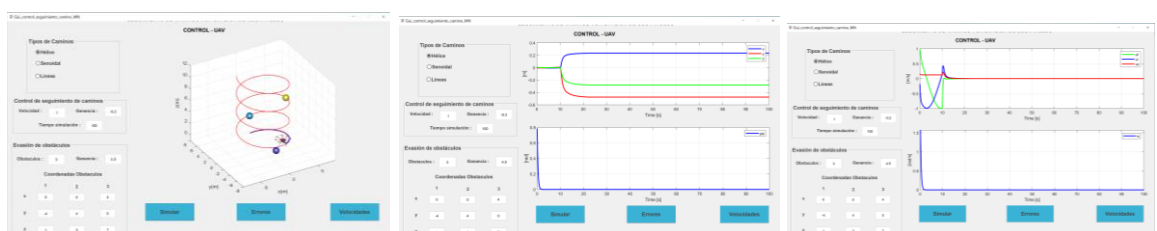


a)

b)

c)

**Figura AVII. 75.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

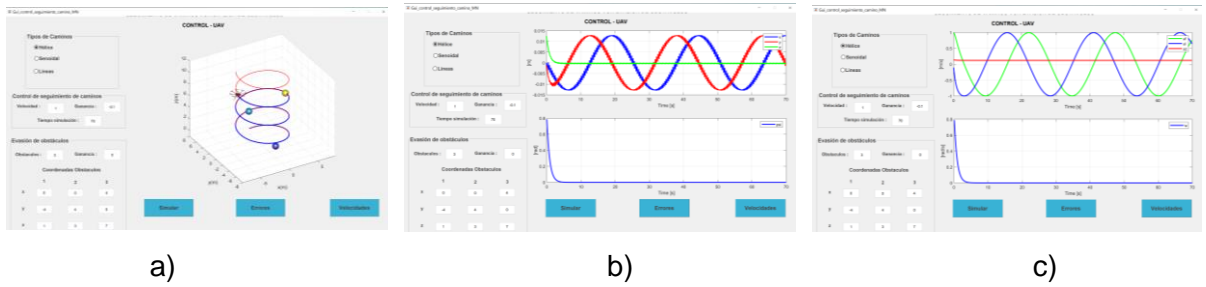


a)

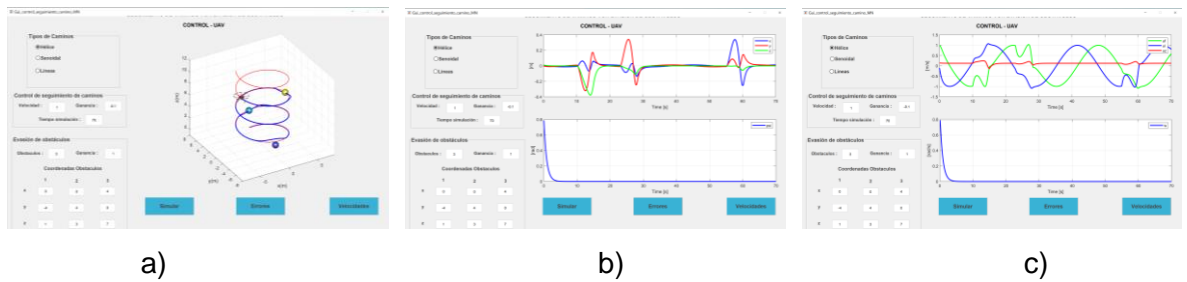
b)

c)

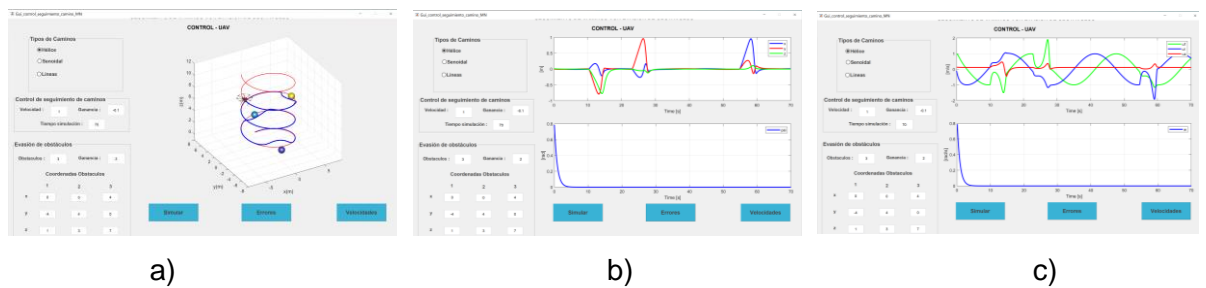
**Figura AVII. 76.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 4.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



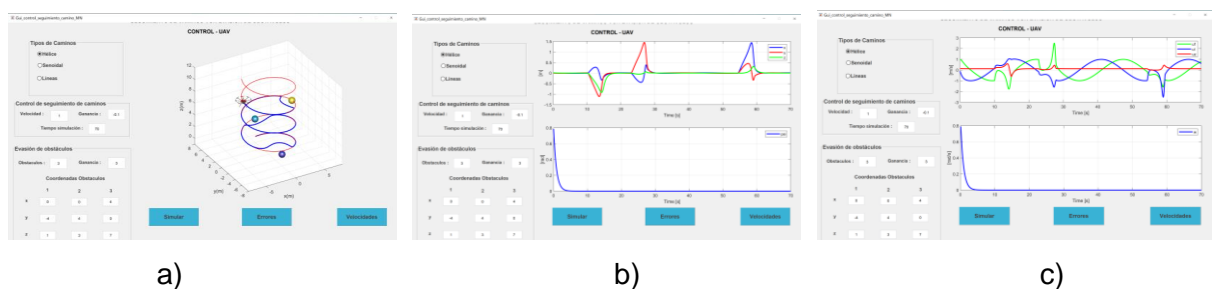
**Figura AVII. 77.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



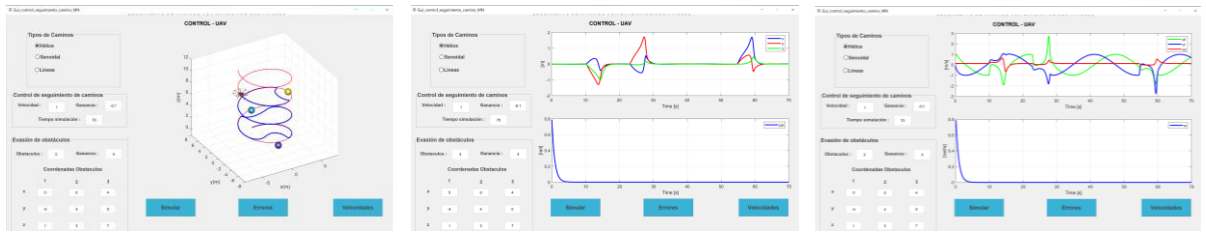
**Figura AVII. 78.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 79.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVII. 80.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

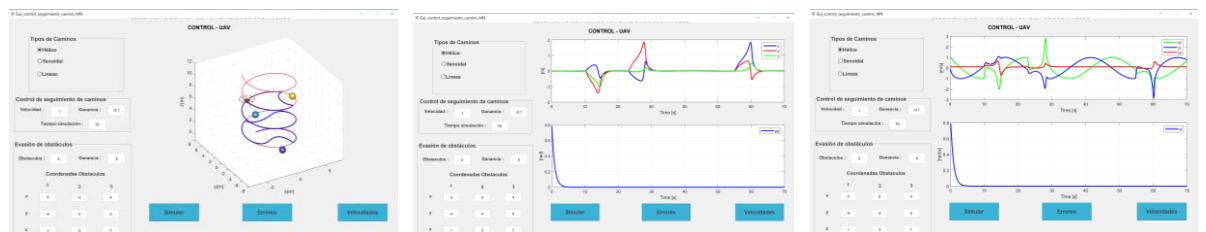


a)

b)

c)

**Figura AVII. 81.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

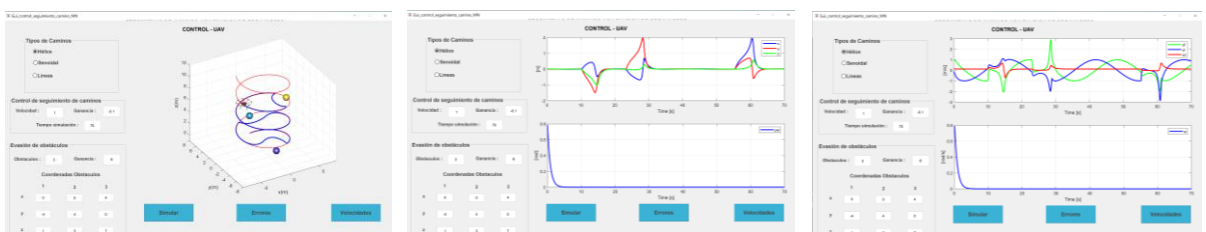


a)

b)

c)

**Figura AVII. 82.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

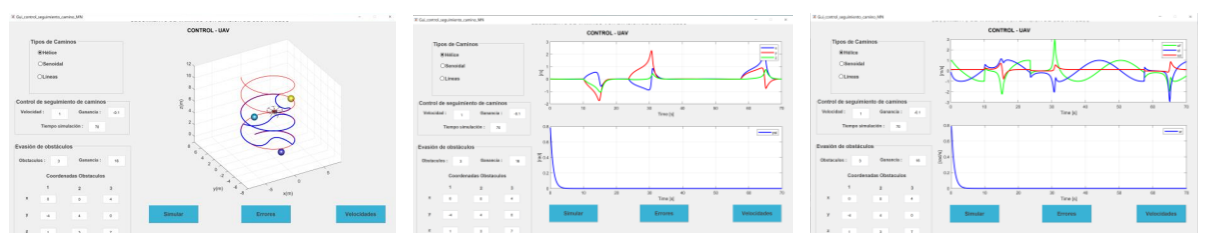


a)

b)

c)

**Figura AVII. 83.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 6$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



a)

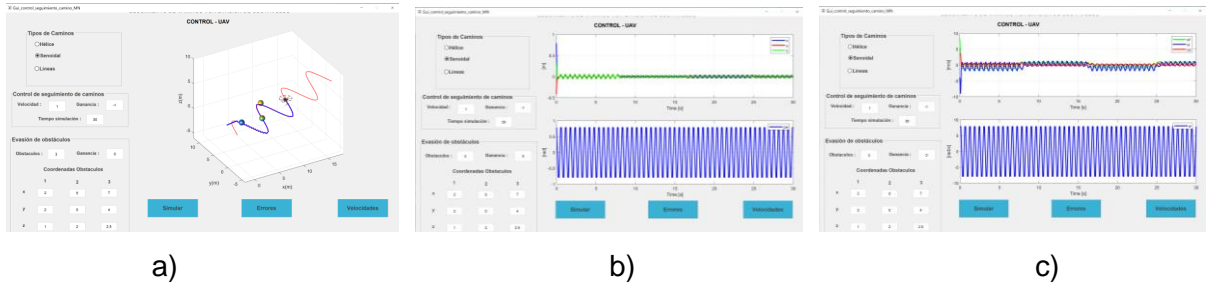
b)

c)

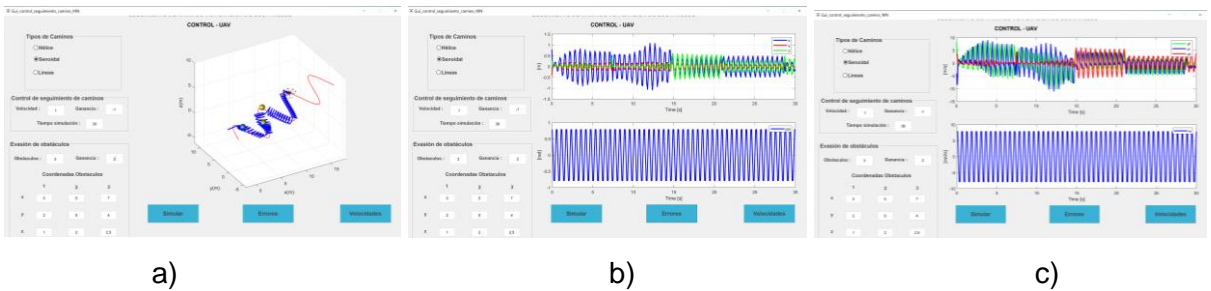
**Figura AVII. 84.** Control de seguimiento de camino Hélice, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 16$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

## ANEXO VIII

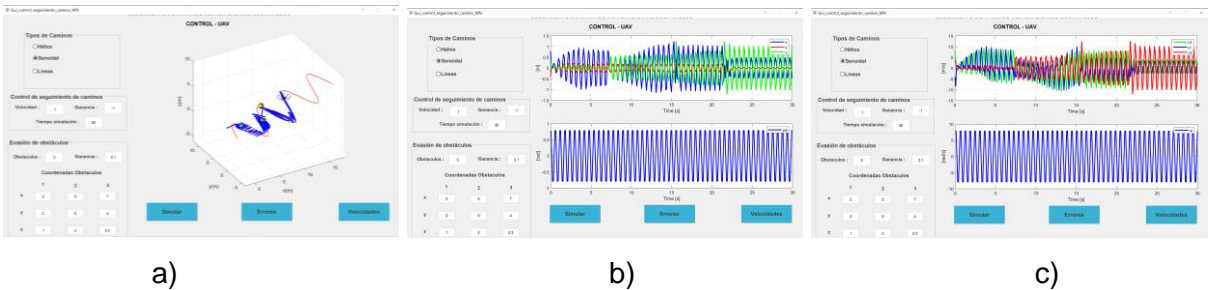
### RESPUESTA DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: SENOIDAL CON 3 OBSTÁCULOS



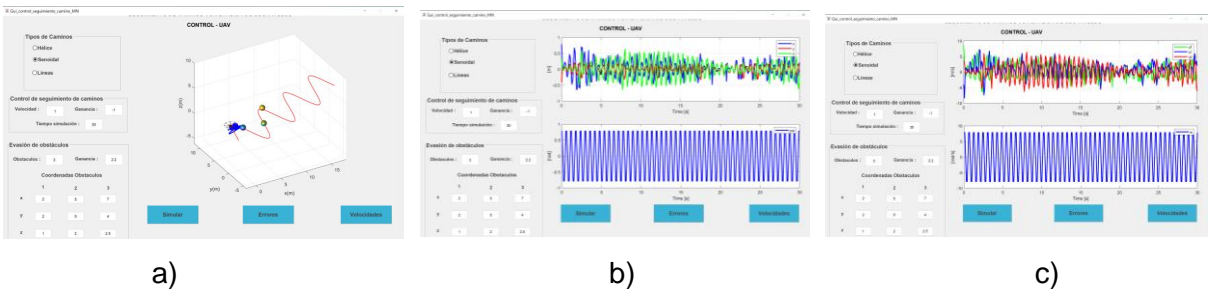
**Figura AVIII. 1.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



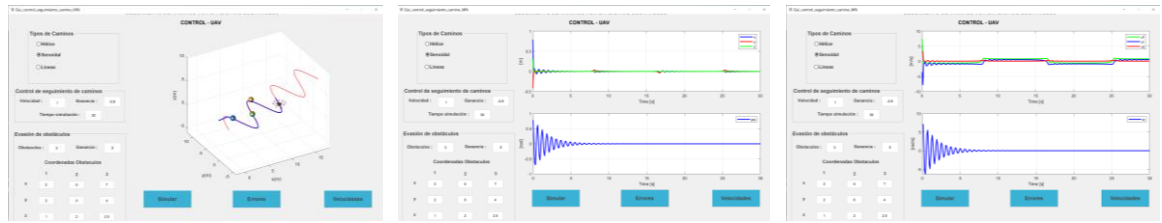
**Figura AVIII. 2.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVIII. 3.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVIII. 4.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

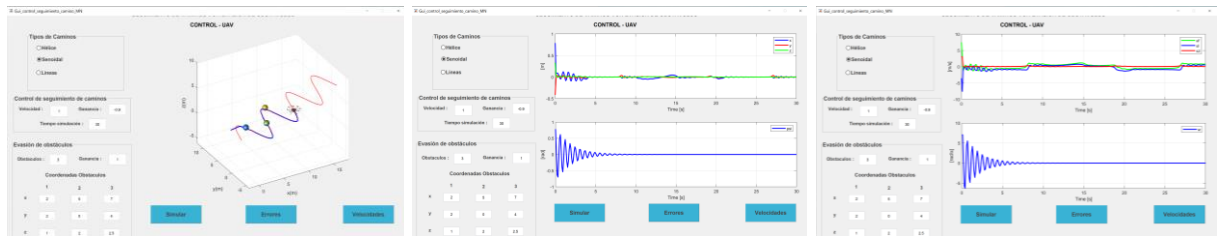


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 5.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

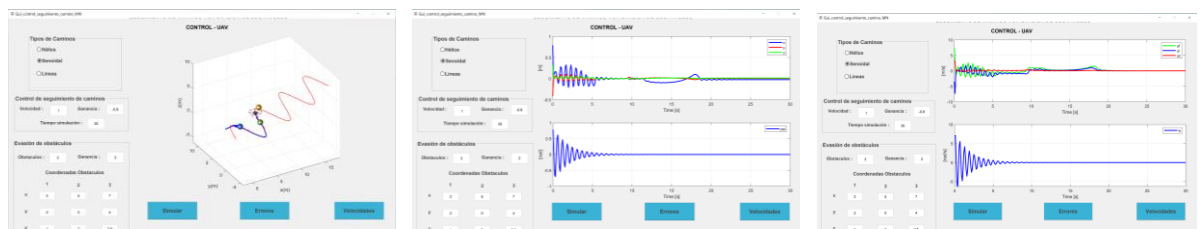


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 6.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

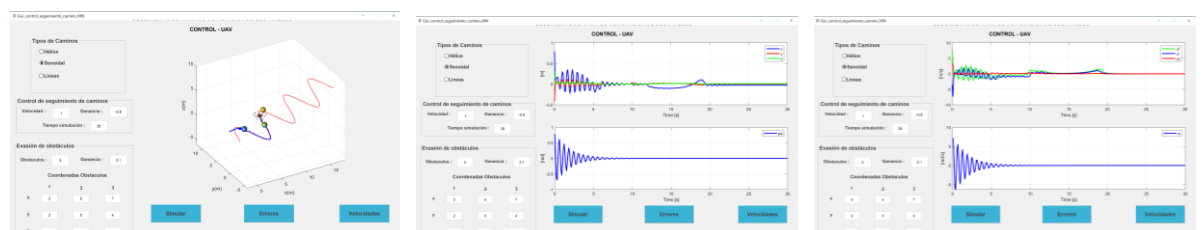


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 7.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

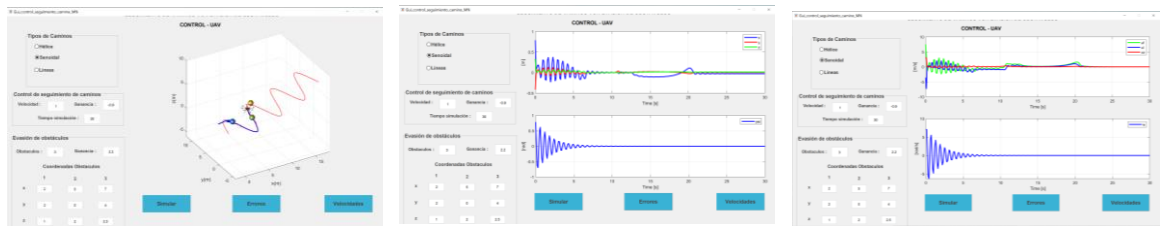


a)

b)

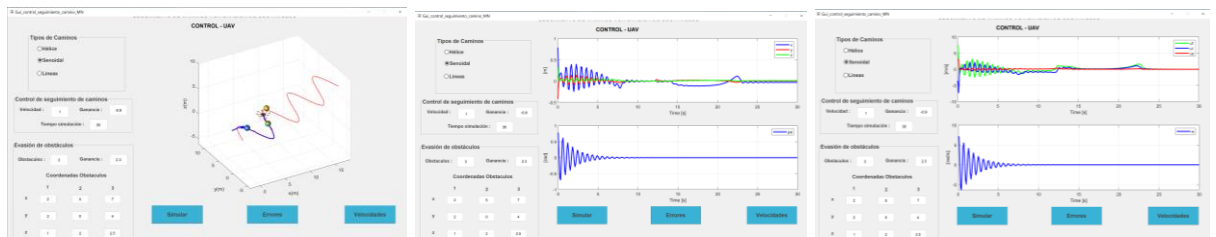
c)

**Figura AVIII. 8.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



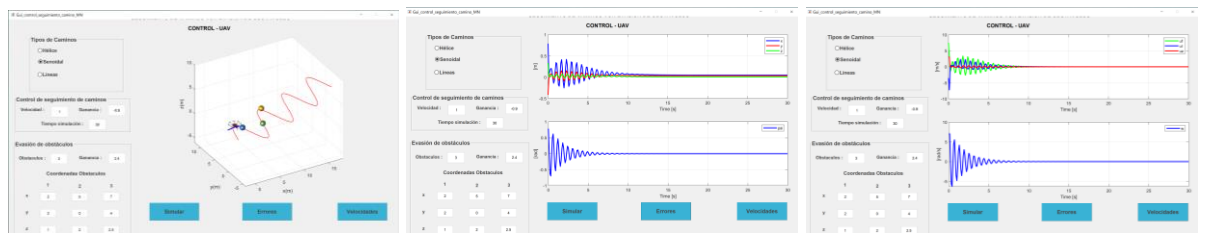
a) b) c)

**Figura AVIII. 9.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



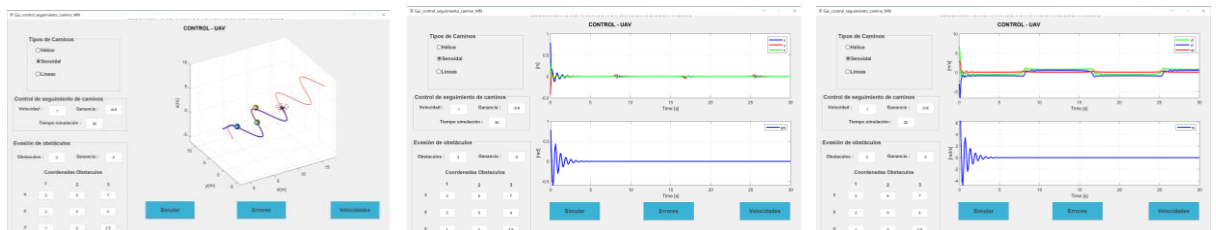
a) b) c)

**Figura AVIII. 10.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



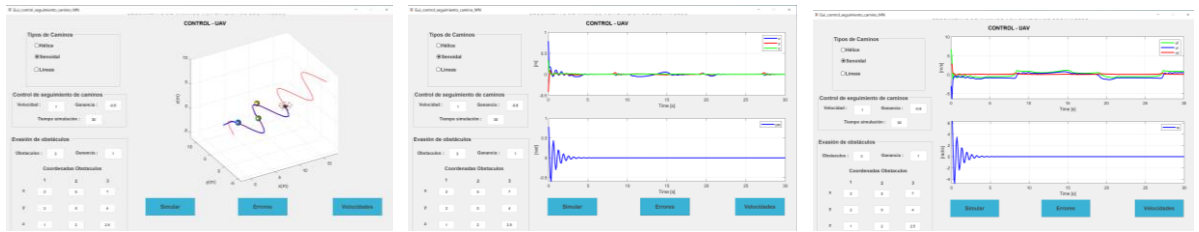
a) b) c)

**Figura AVIII. 11.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



a) b) c)

**Figura AVIII. 12.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

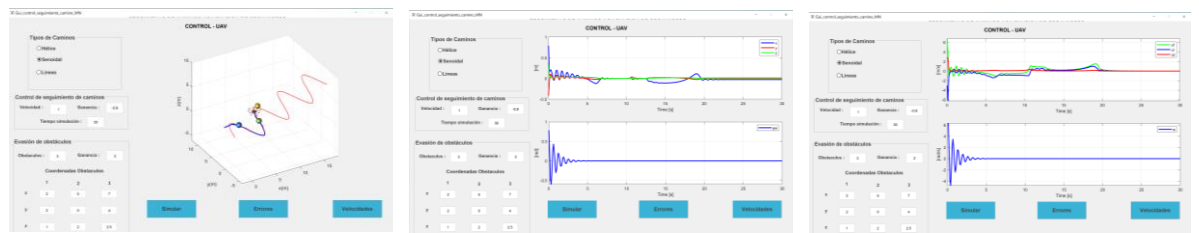


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 13.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

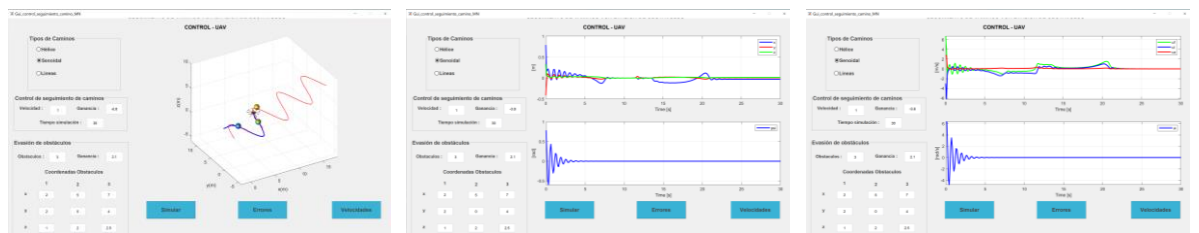


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 14.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

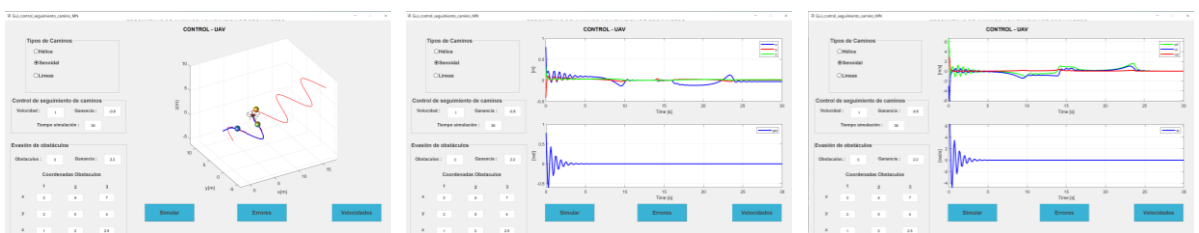


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 15.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



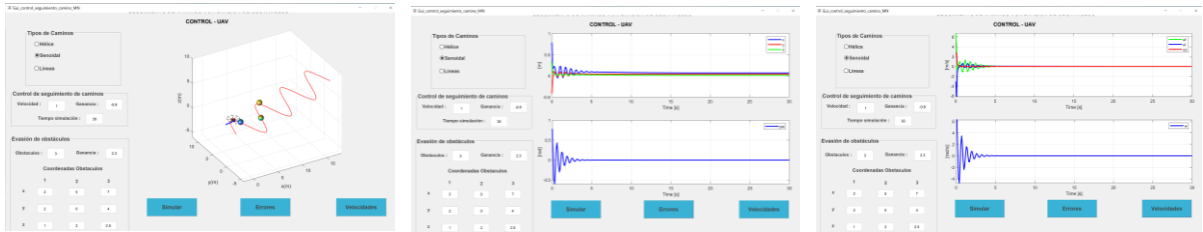
a)

b)

c)

**Figura AVIII. 16.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



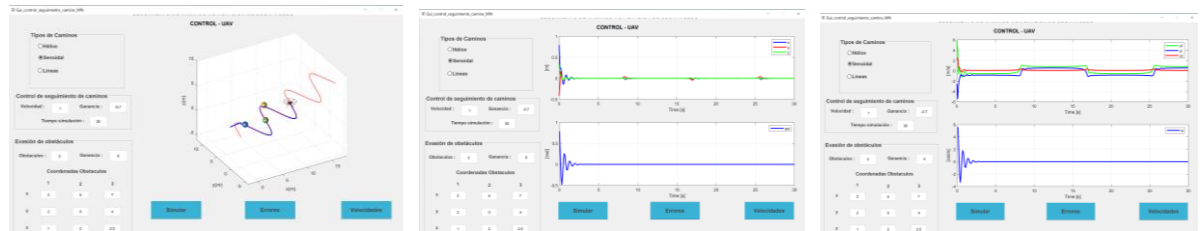


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 17.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

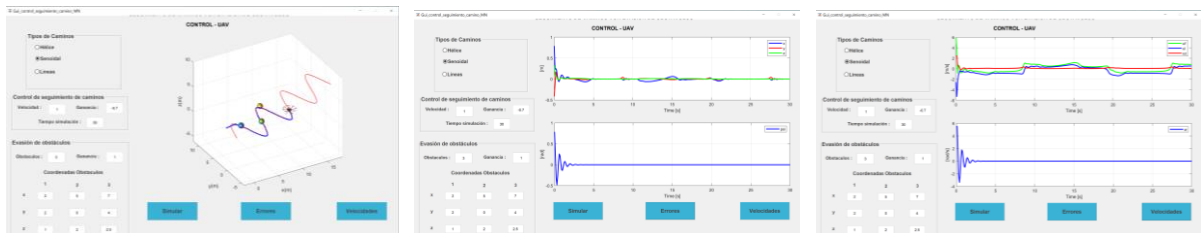


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 18.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

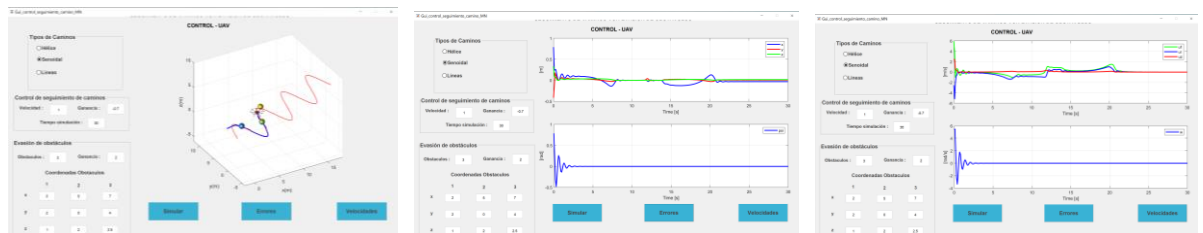


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 19.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

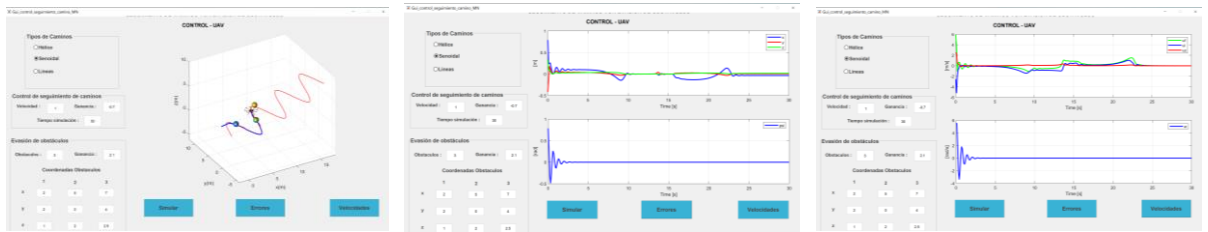


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 20.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

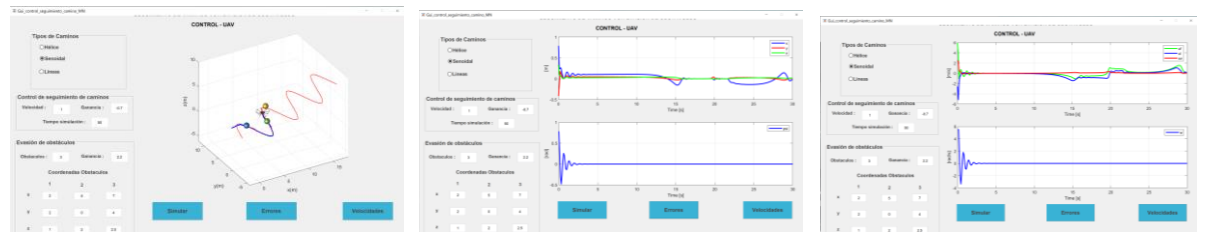


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 21.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

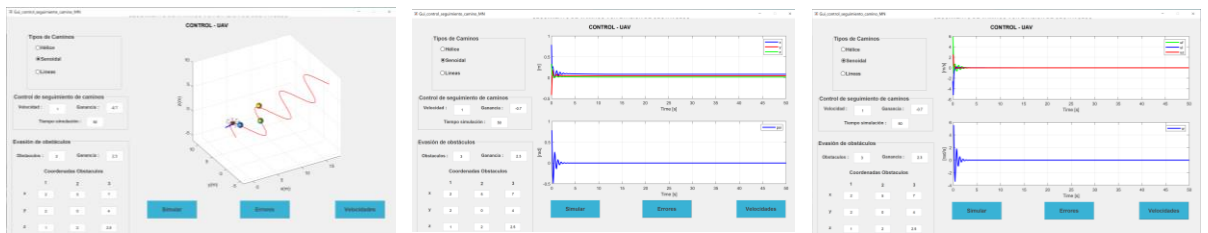


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 22.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

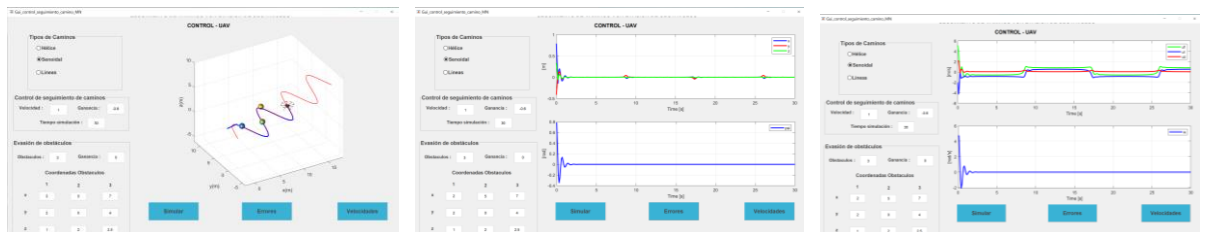


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 23.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

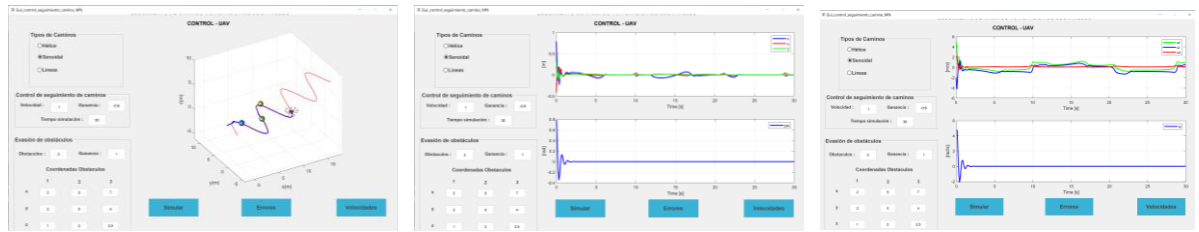


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 24.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

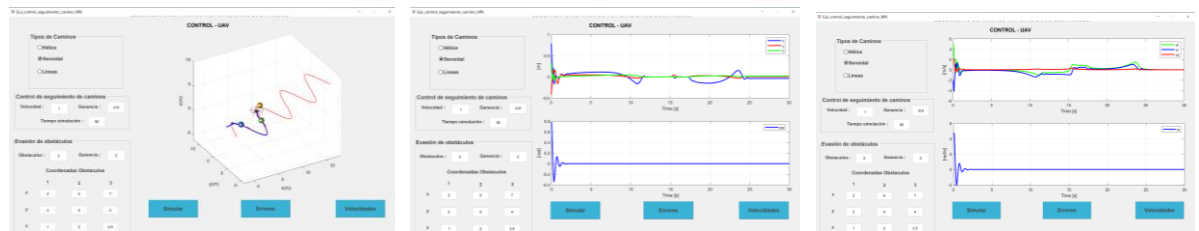


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 25.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

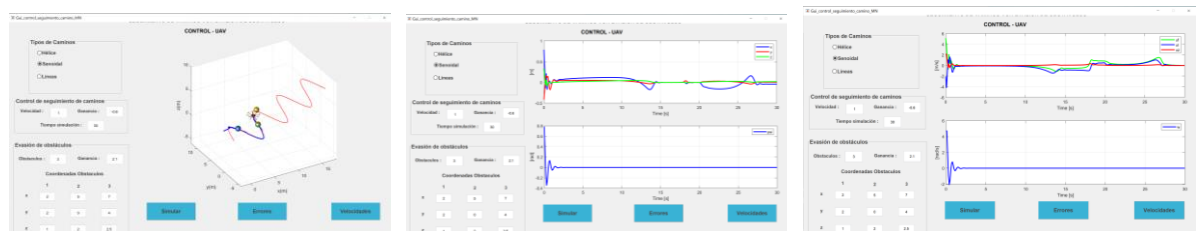


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 26.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

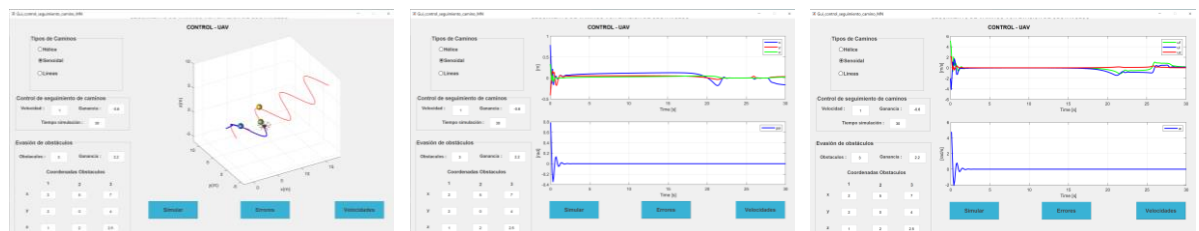


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 27.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

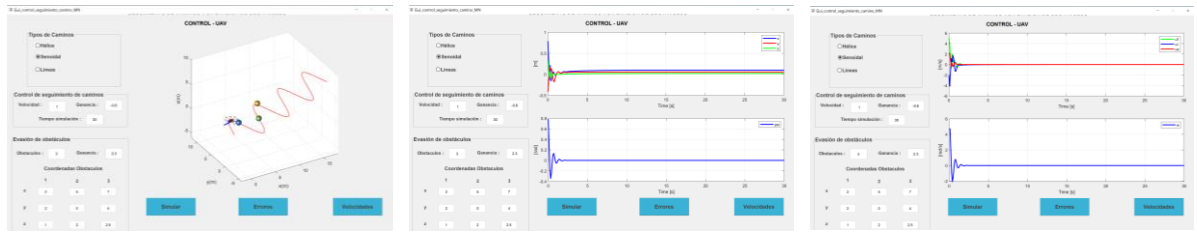


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 28.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

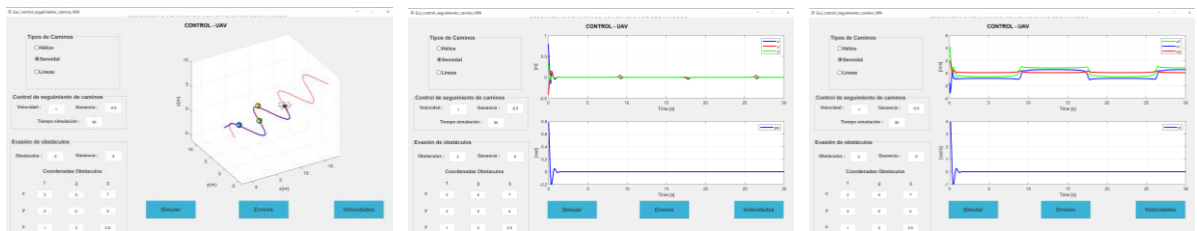


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 29.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

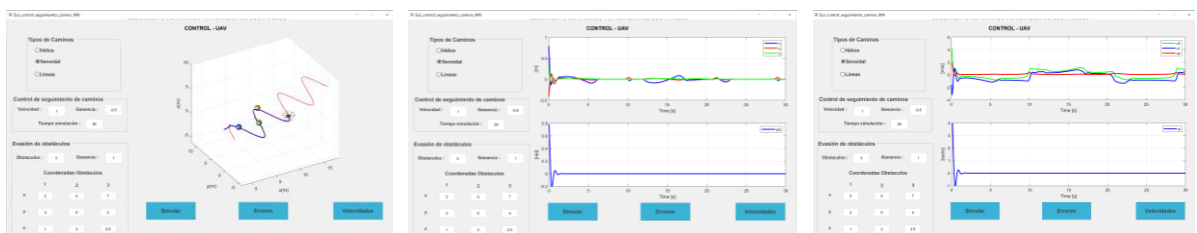


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 30.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

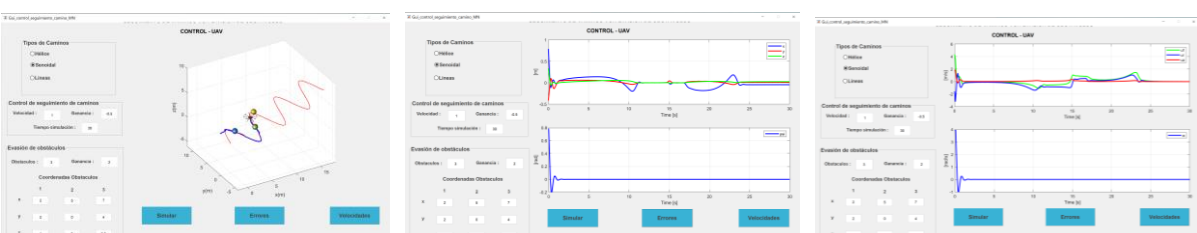


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 31.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

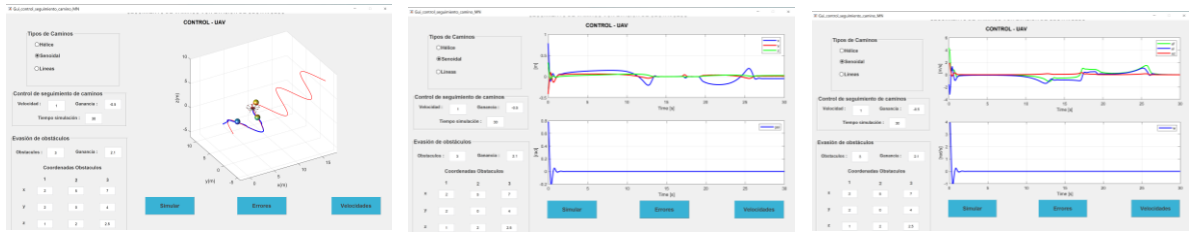


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 32.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

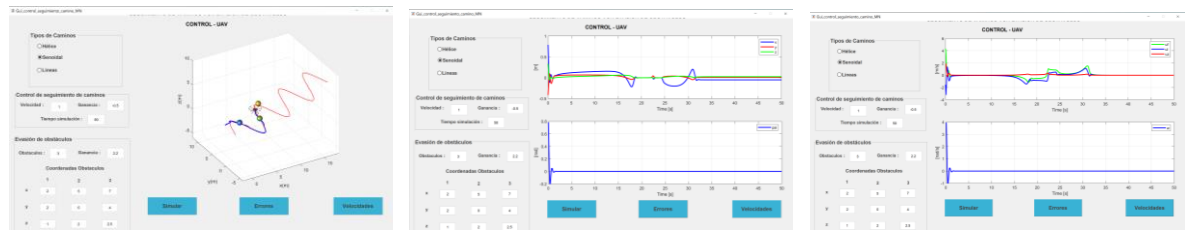


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 33.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

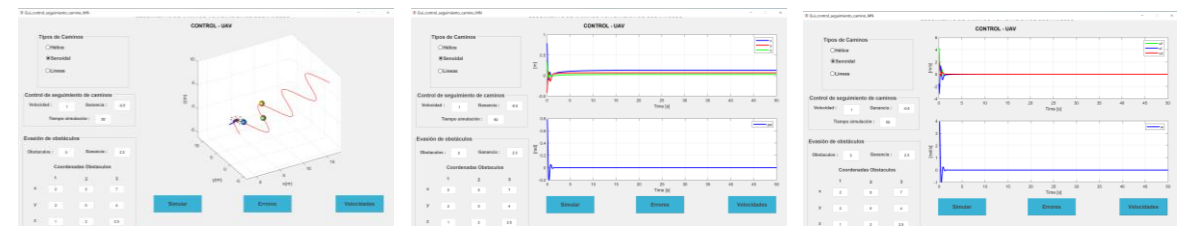


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 34.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

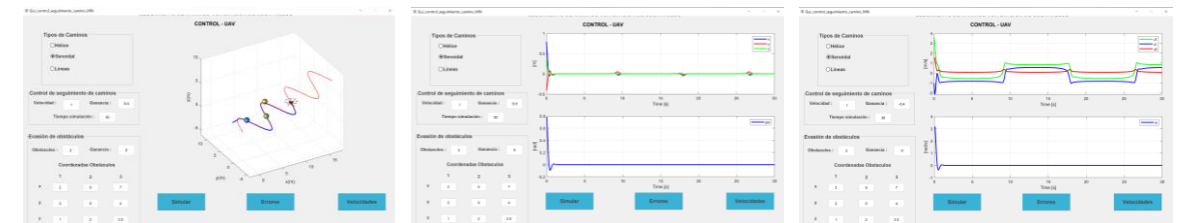


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 35.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

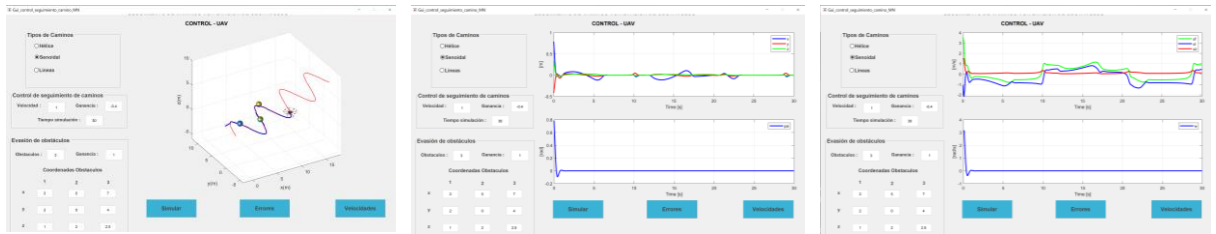


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 36.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

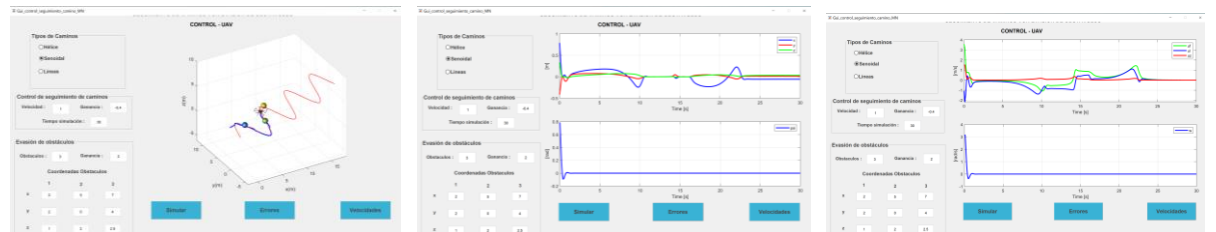


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 37.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

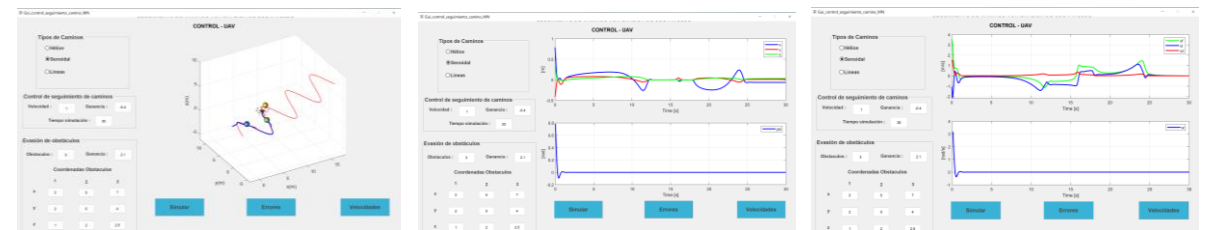


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 38.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

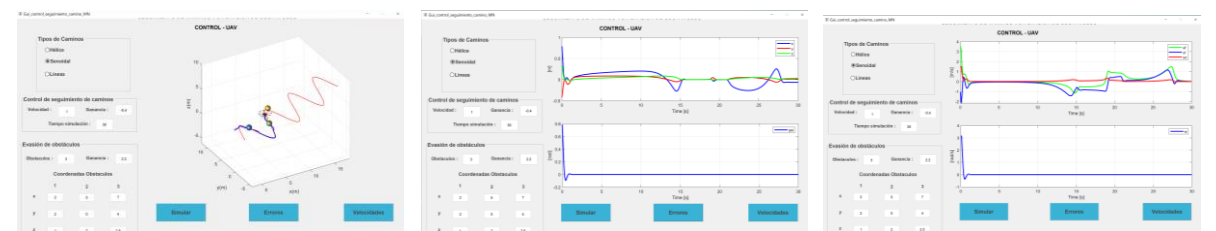


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 39.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

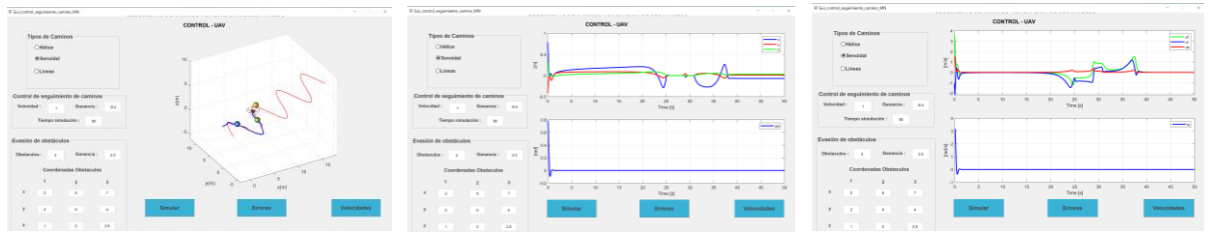


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 40.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

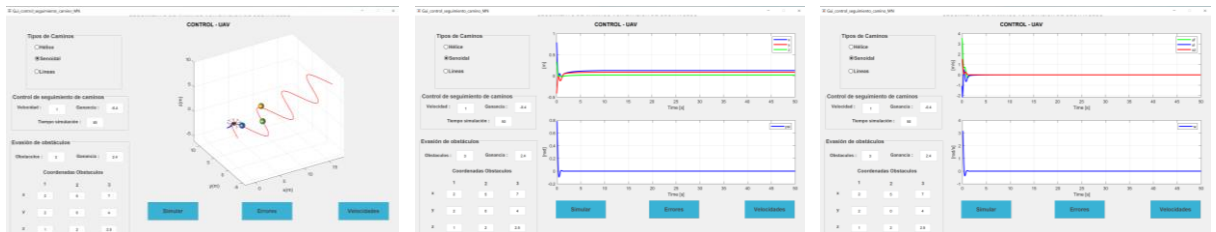


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 41.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

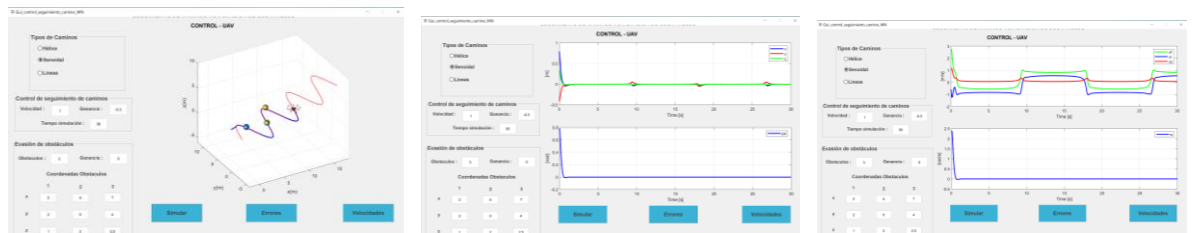


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 42.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

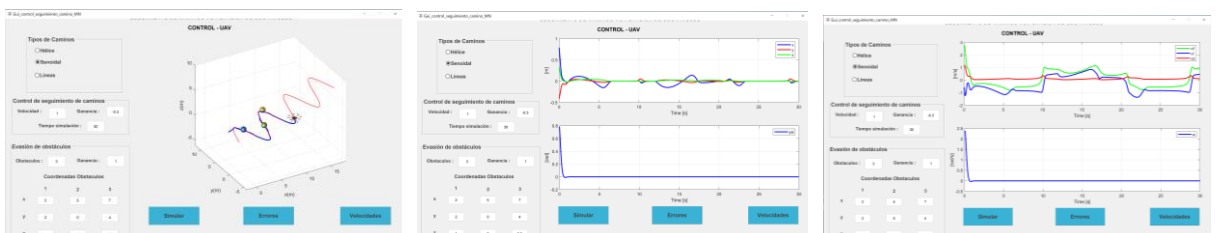


a)

b)

c)

**Figura AVIII. 43.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

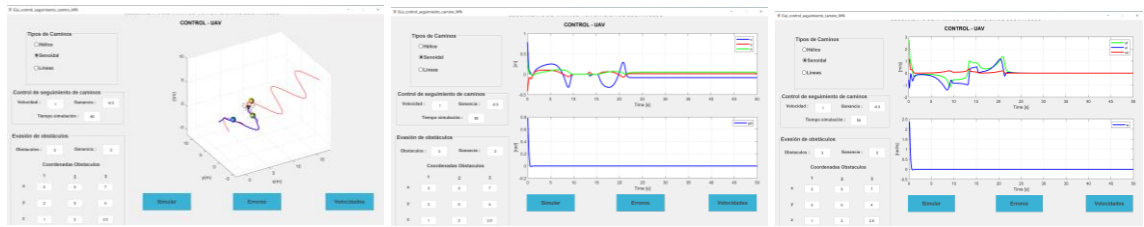


a)

b)

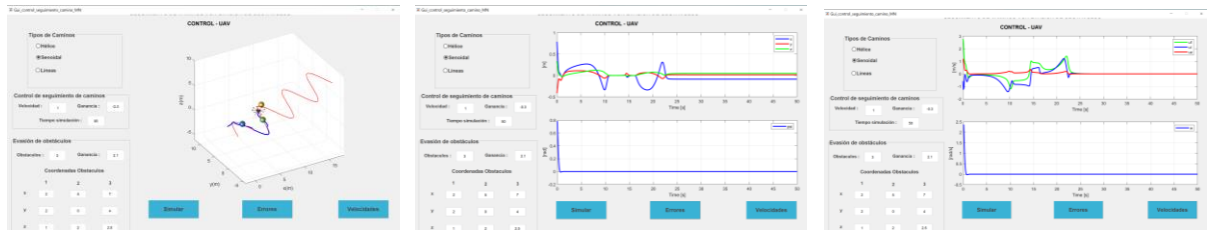
c)

**Figura AVIII. 44.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



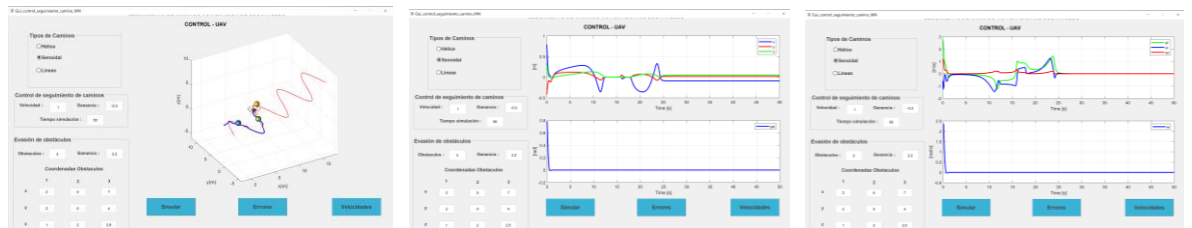
a) b) c)

**Figura AVIII. 45.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



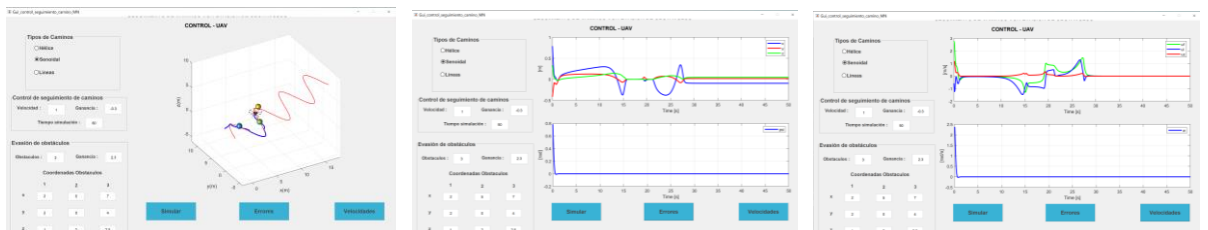
a) b) c)

**Figura AVIII. 46.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



a) b) c)

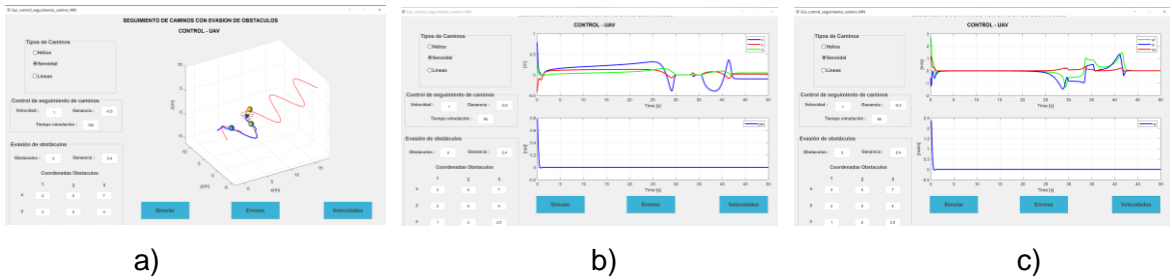
**Figura AVIII. 47.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



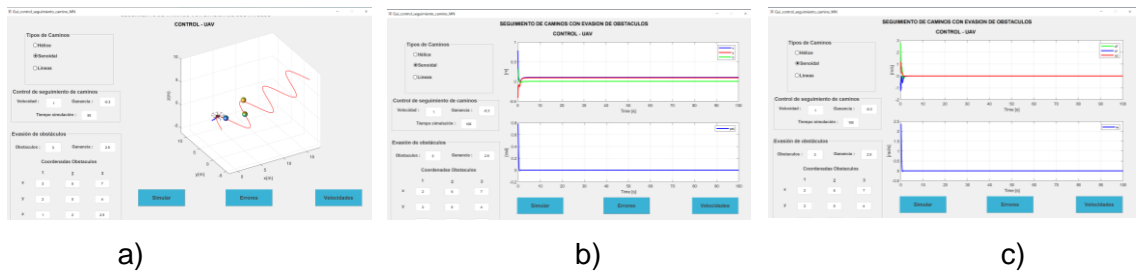
a) b) c)

**Figura AVIII. 48.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

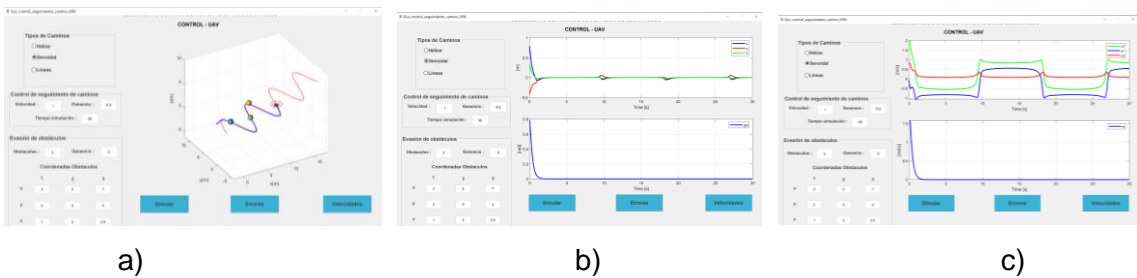




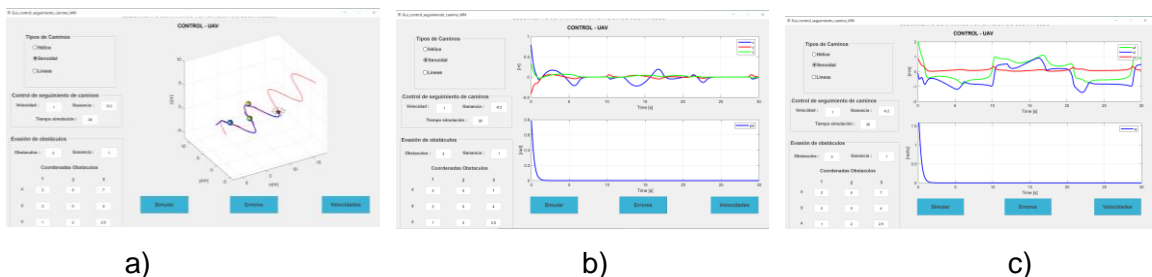
**Figura AVIII. 49.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



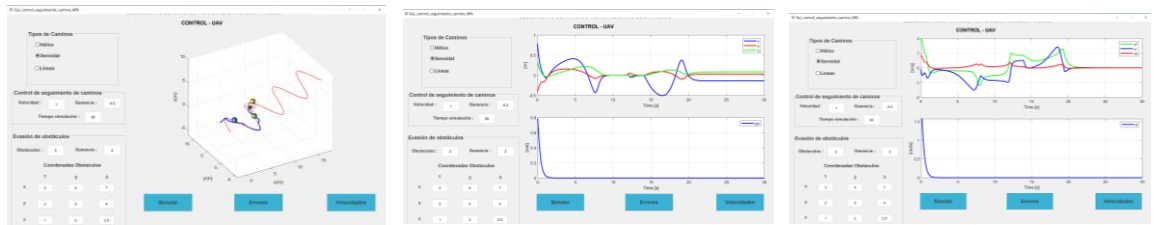
**Figura AVIII. 50.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVIII. 51.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

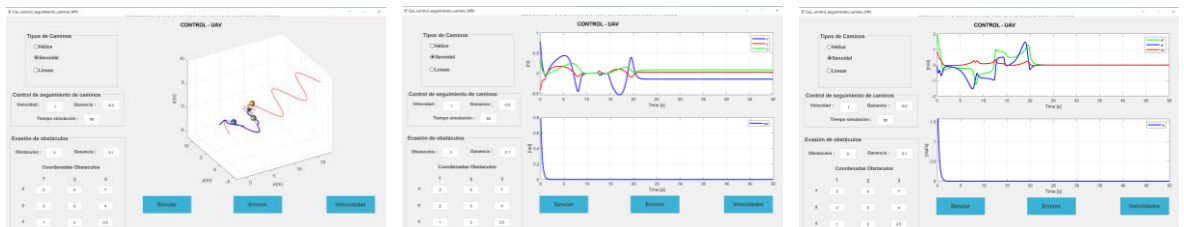


**Figura AVIII. 52.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



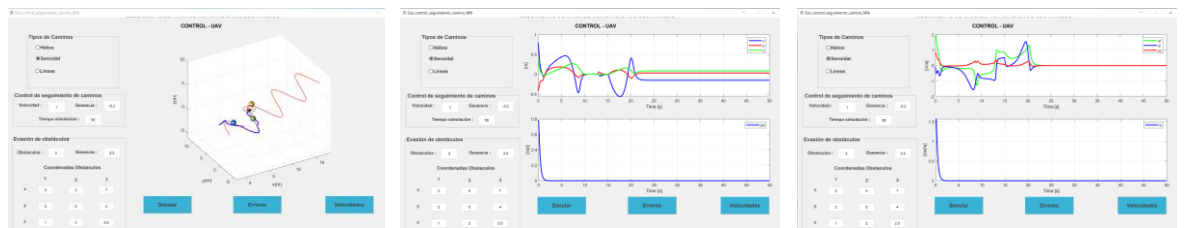
a) b) c)

**Figura AVIII. 53.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



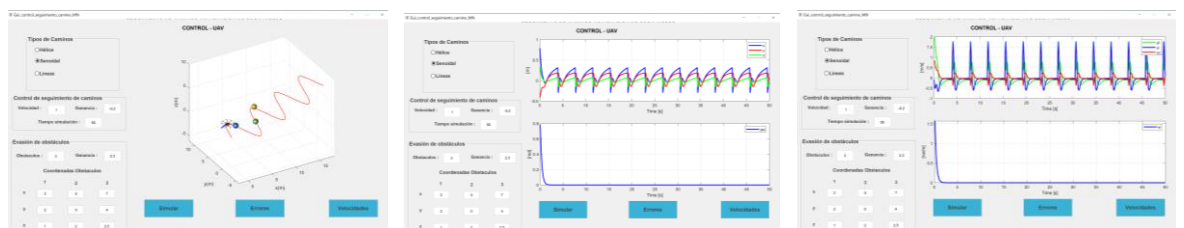
a) b) c)

**Figura AVIII. 54.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



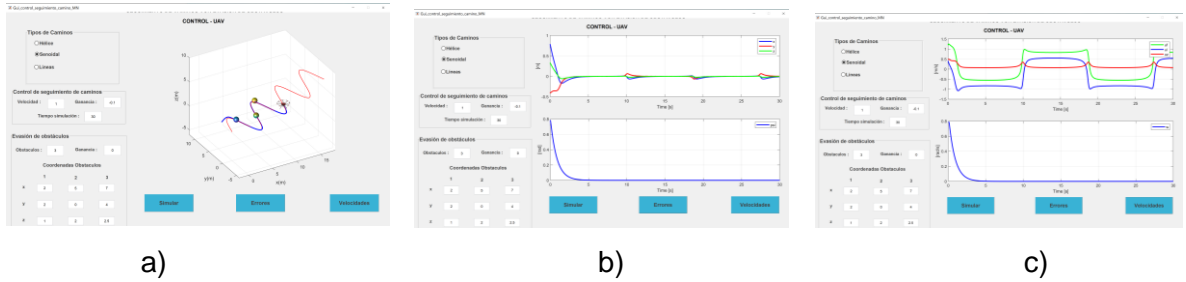
a) b) c)

**Figura AVIII. 55.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

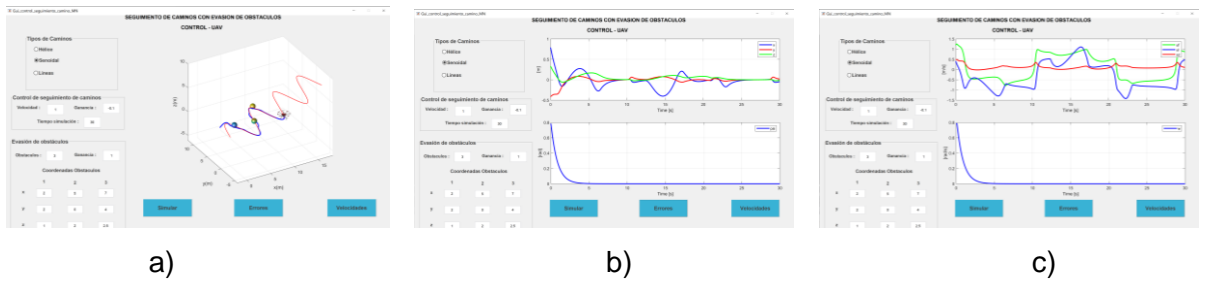


a) b) c)

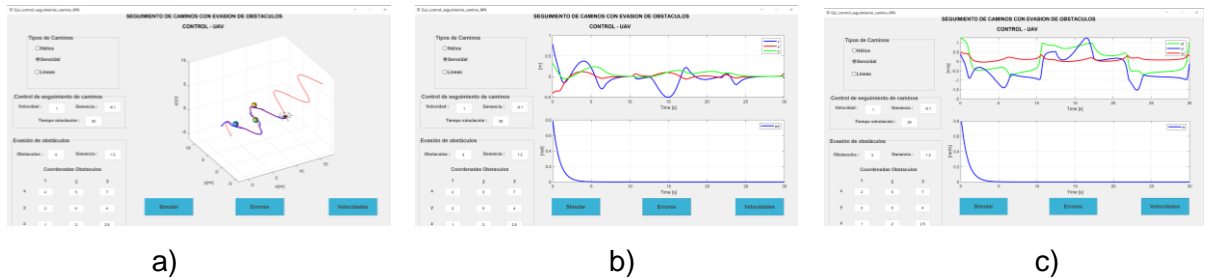
**Figura AVIII. 56.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



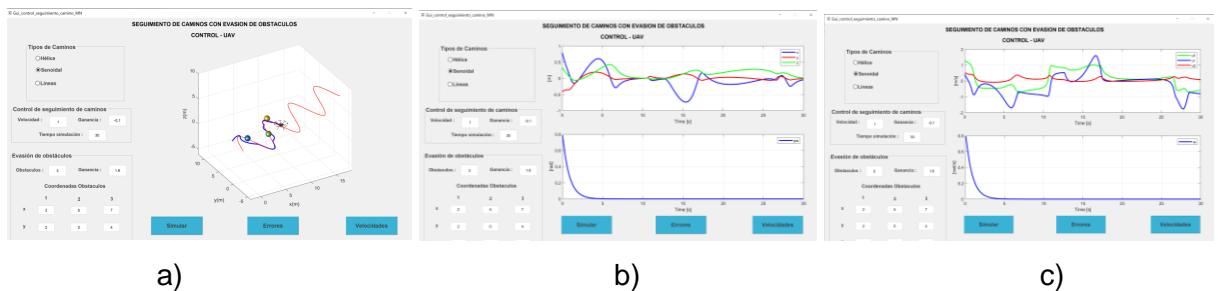
**Figura AVIII. 57.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



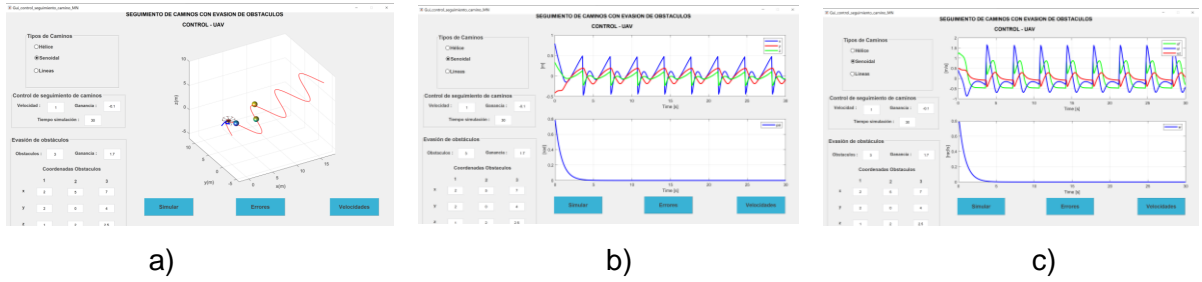
**Figura AVIII. 58.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVIII. 59.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

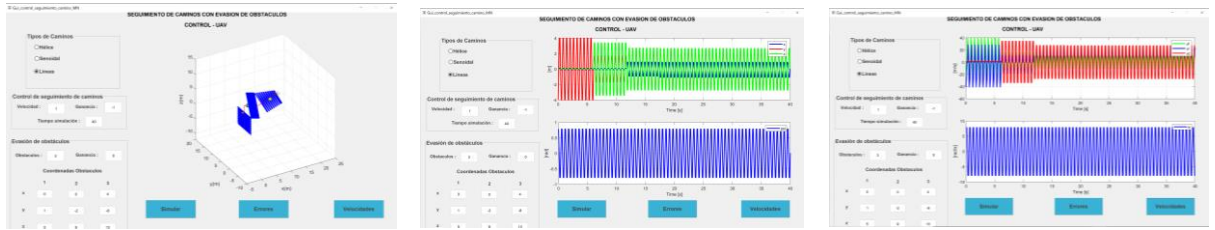


**Figura AVIII. 60.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AVIII. 61.** Control de seguimiento de camino Senoidal, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0, -4, 1)$ ,  $P_2 = (0, 4, 3)$  y  $P_3 = (4, 0, 7)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

ANEXO IX  
RESPUESTA DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE  
CAMINO: LÍNEAS CON 3 OBSTÁCULOS

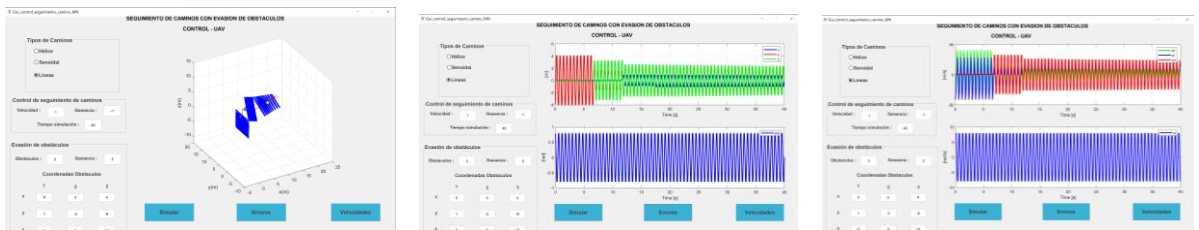


a)

b)

c)

**Figura AIX. 1.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

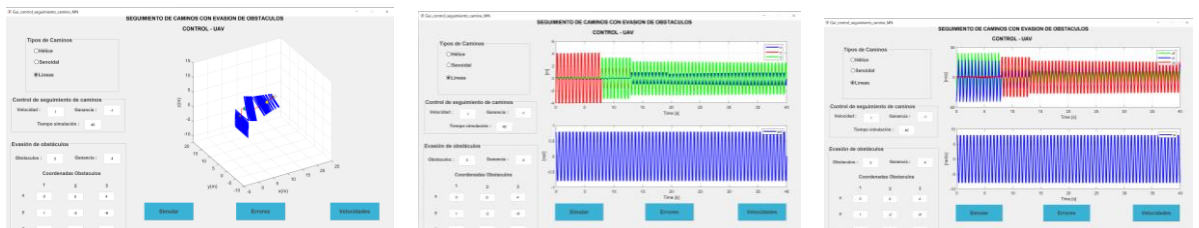


a)

b)

c)

**Figura AIX. 2.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

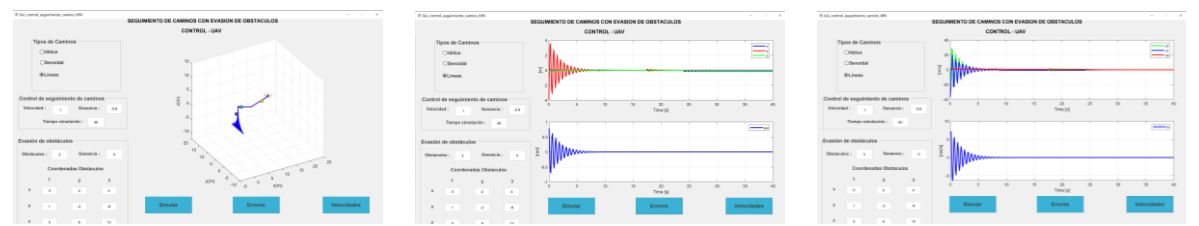


a)

b)

c)

**Figura AIX. 3.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -1$  y  $Ganancia = 4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

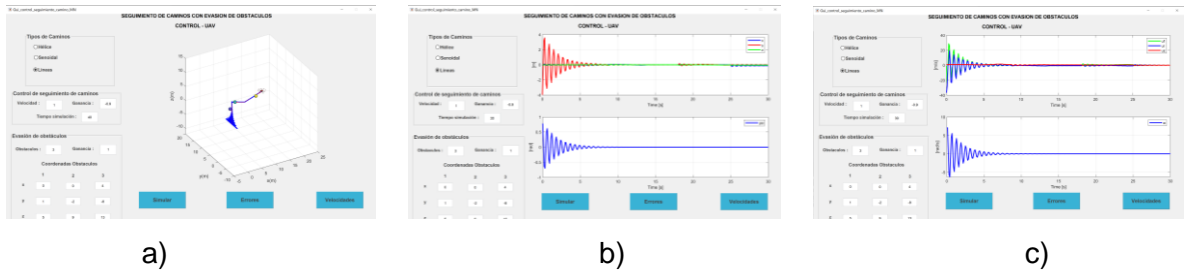


a)

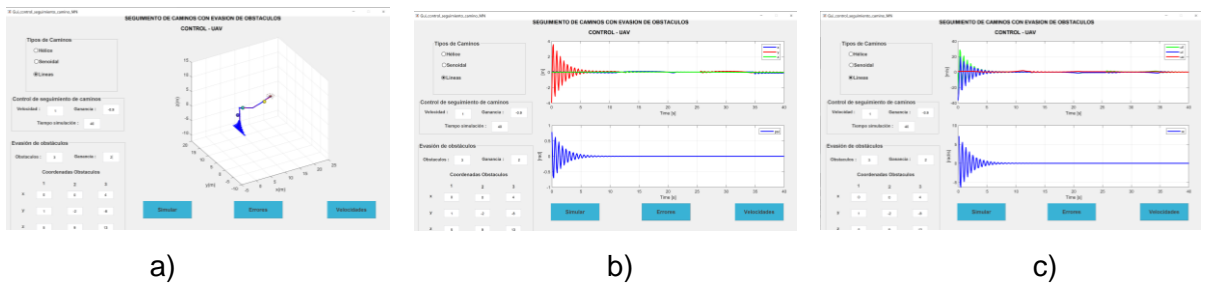
b)

c)

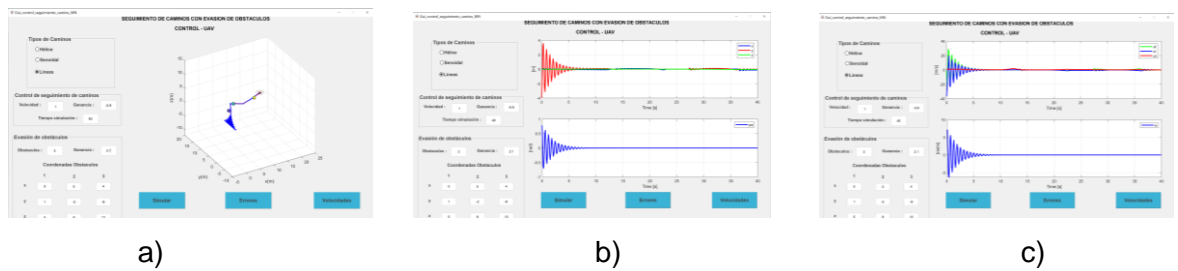
**Figura AIX. 4.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



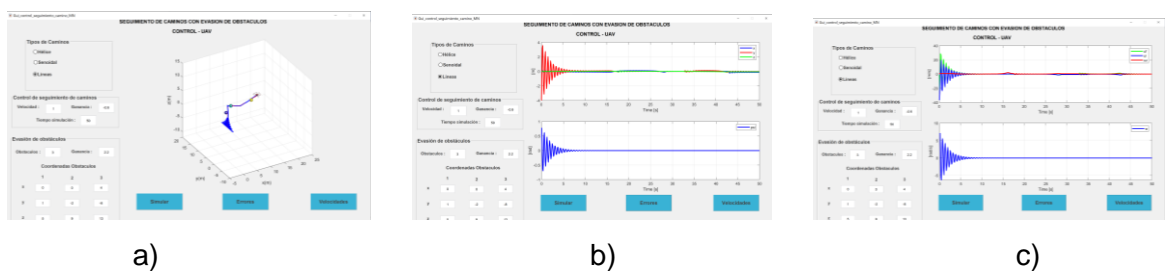
**Figura AIX. 5.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



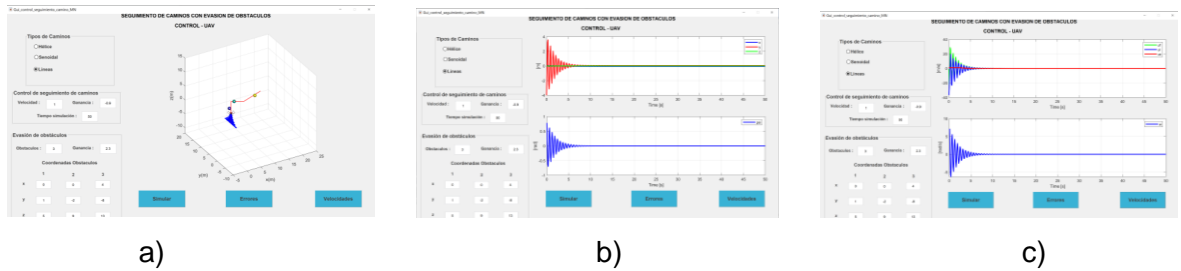
**Figura AIX. 6.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



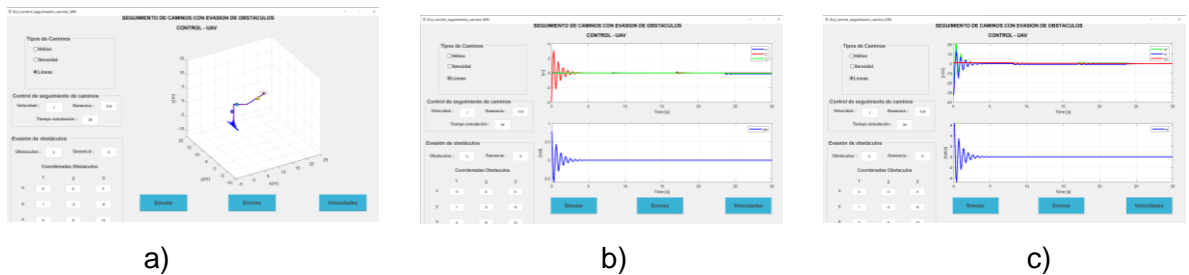
**Figura AIX. 7.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



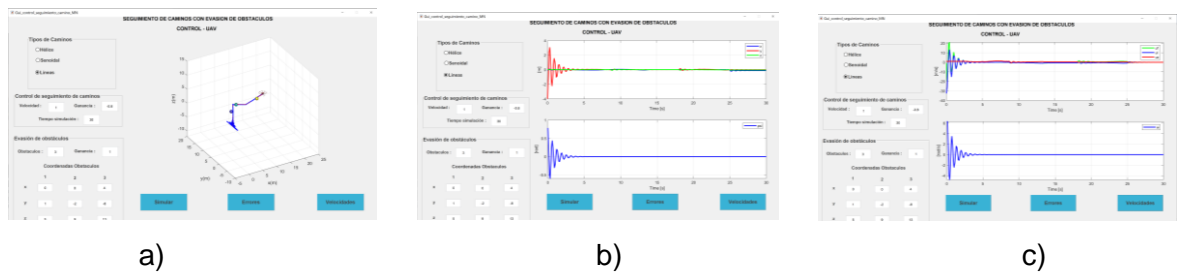
**Figura AIX. 8.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



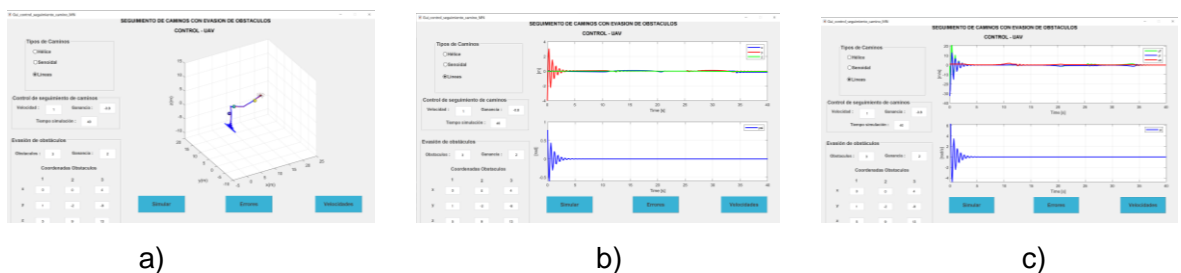
**Figura AIX. 9.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.9$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 10.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

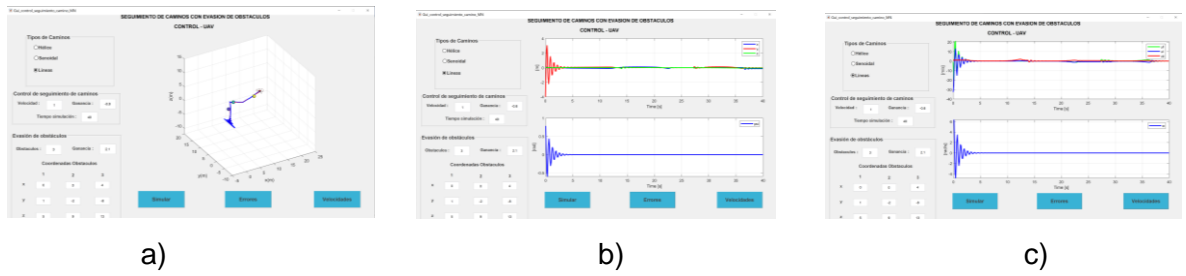


**Figura AIX. 11.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

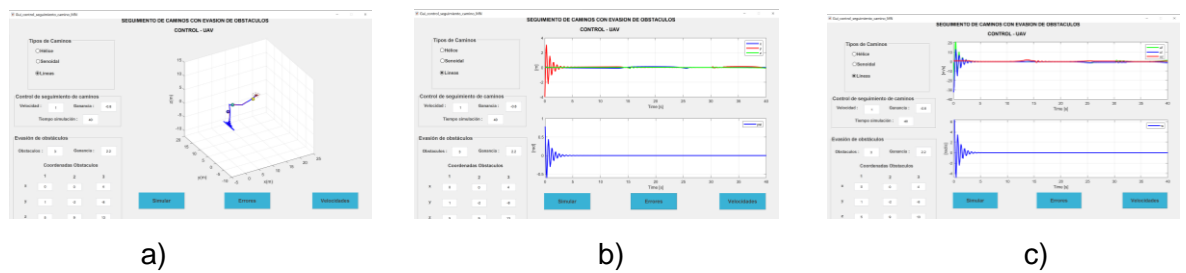


**Figura AIX. 12.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

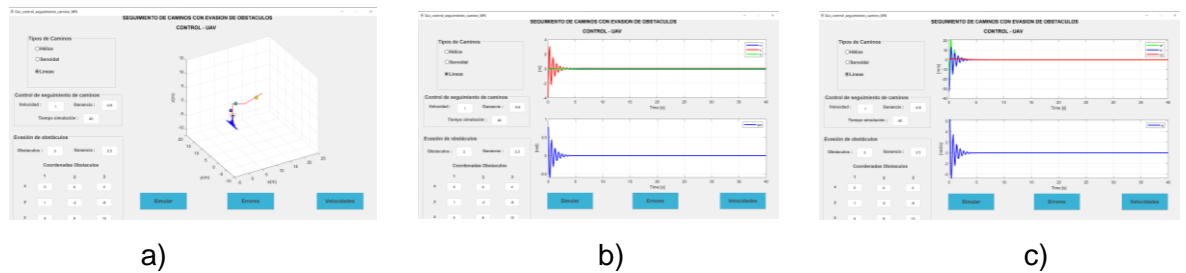




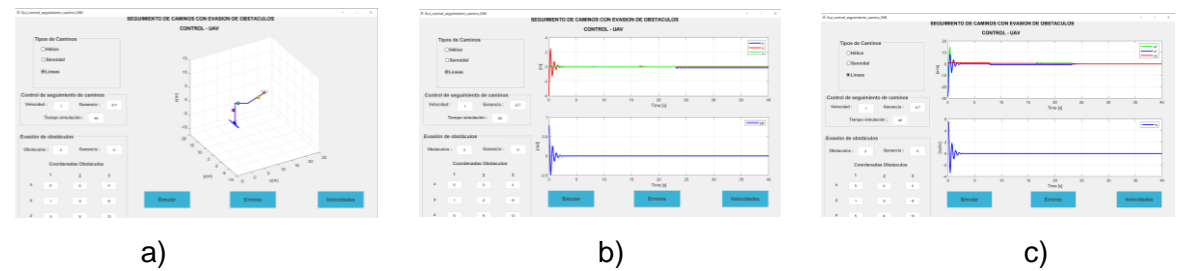
**Figura AIX. 13.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



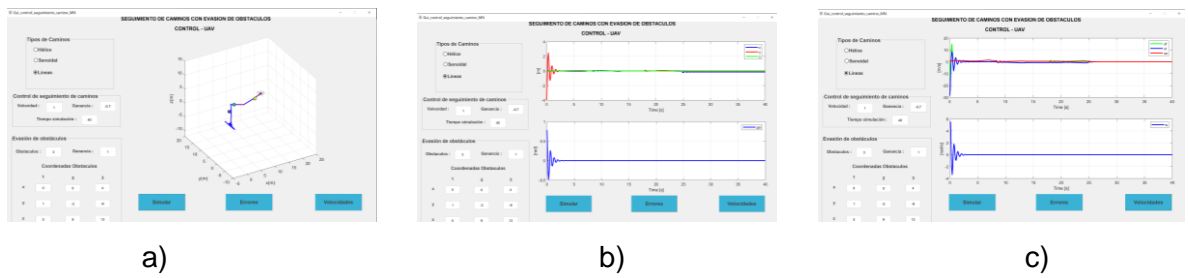
**Figura AIX. 14.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



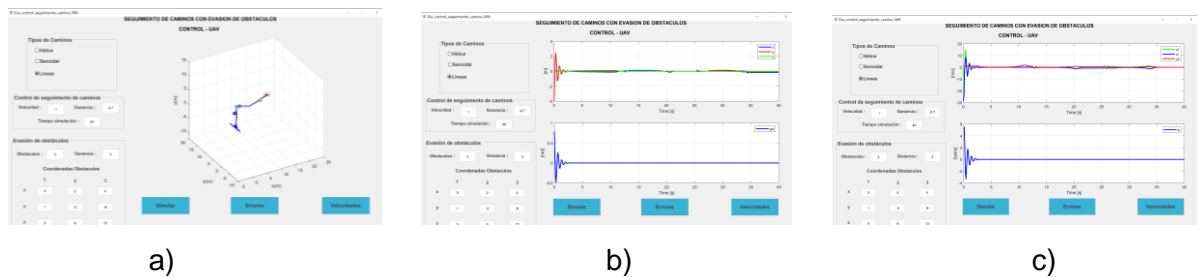
**Figura AIX. 15.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.8$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



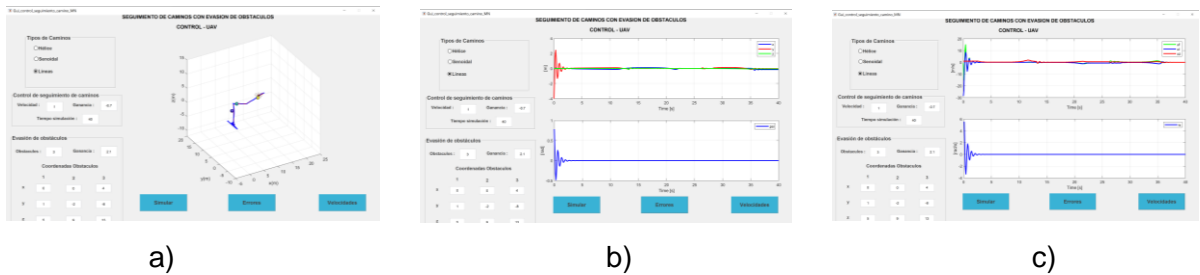
**Figura AIX. 16.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



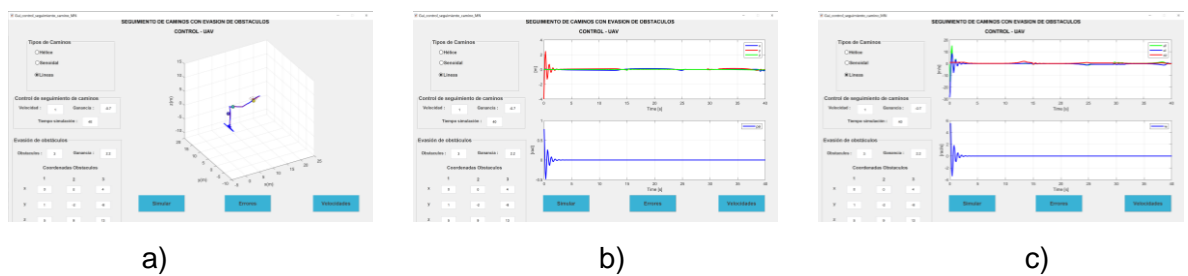
**Figura AIX. 17.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



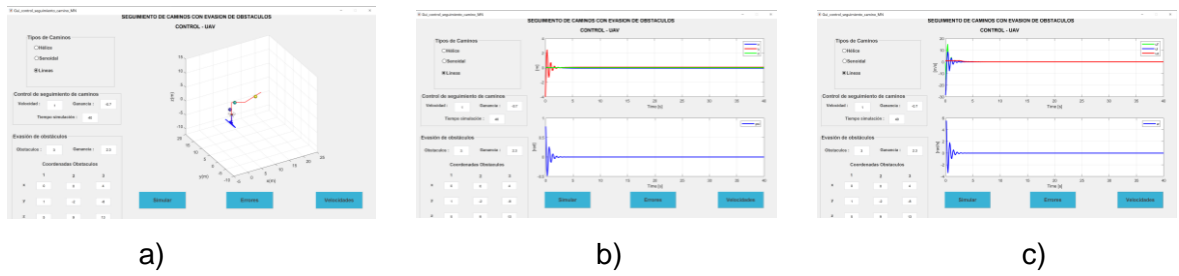
**Figura AIX. 18.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



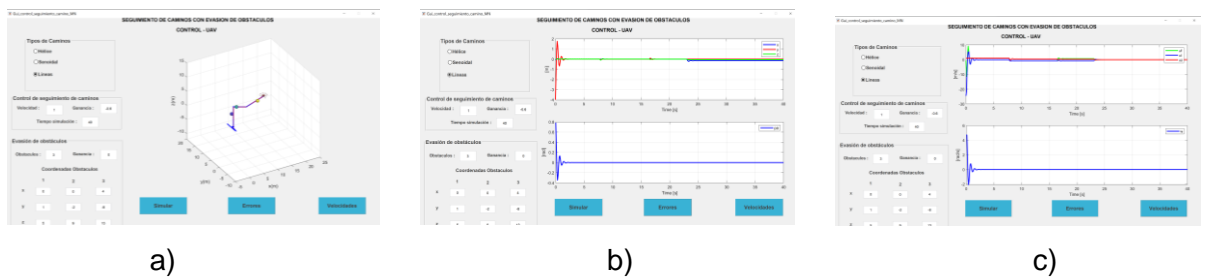
**Figura AIX. 19.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



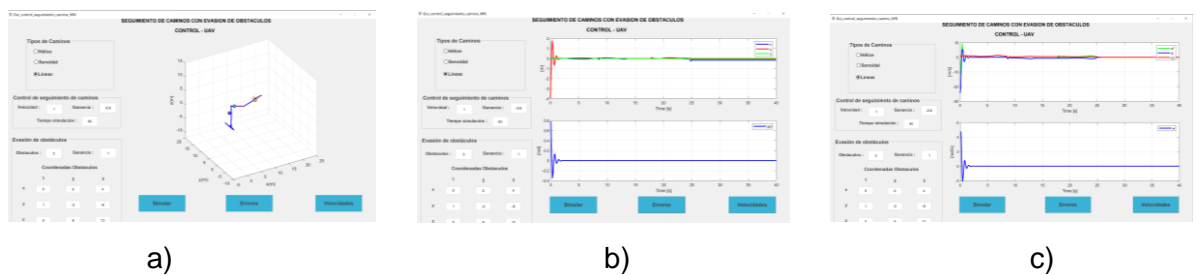
**Figura AIX. 20.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



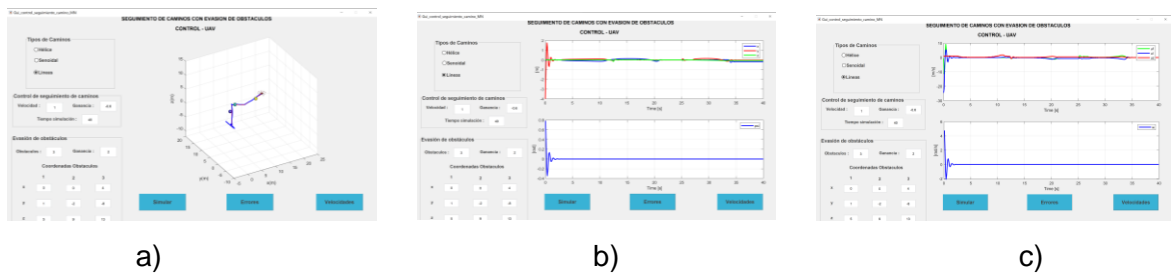
**Figura AIX. 21.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.7$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



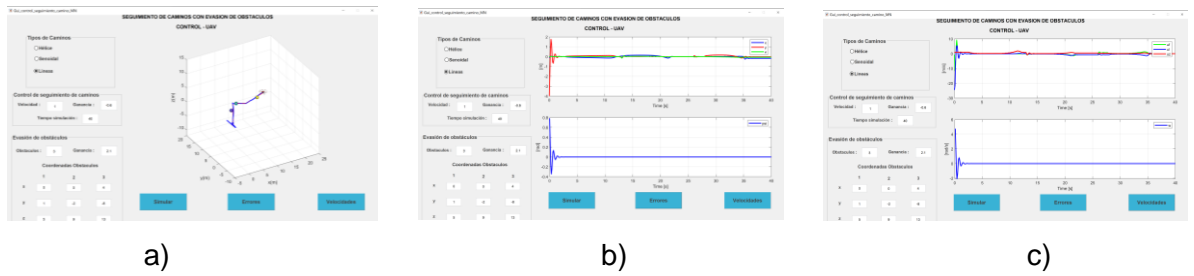
**Figura AIX. 22.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



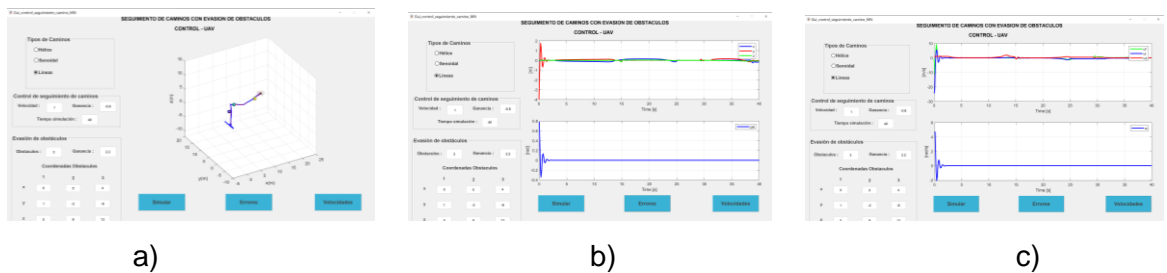
**Figura AIX. 23.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



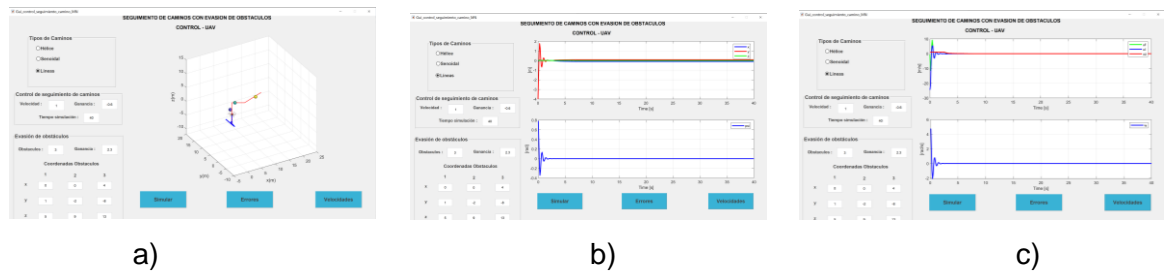
**Figura AIX. 24.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



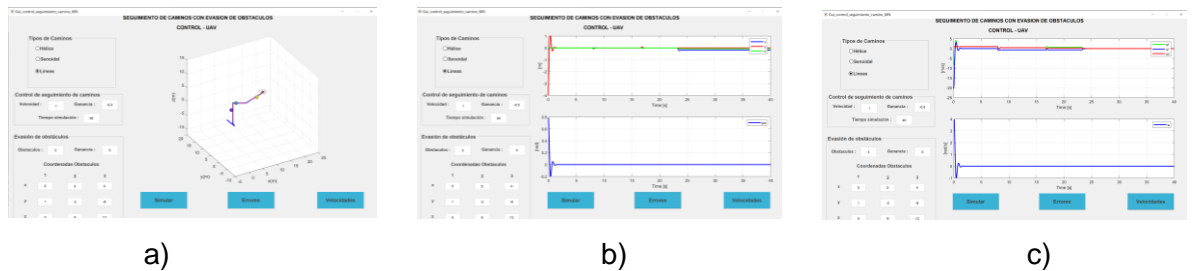
**Figura AIX. 25.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



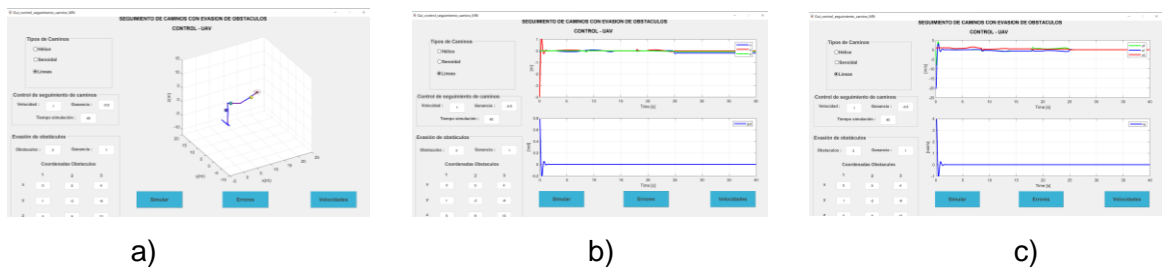
**Figura AIX. 26.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



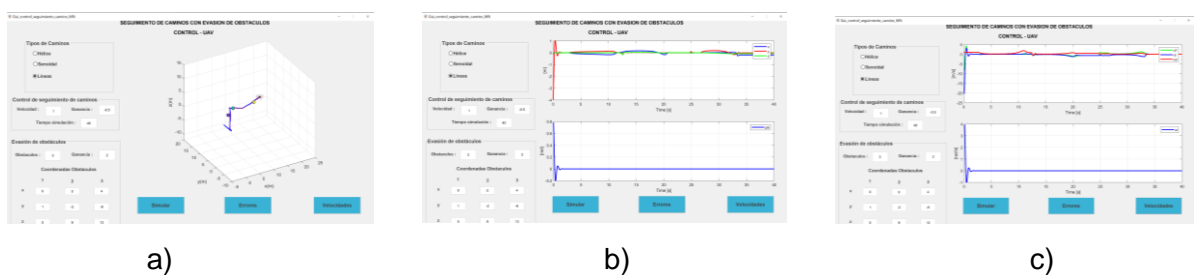
**Figura AIX. 27.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.6$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



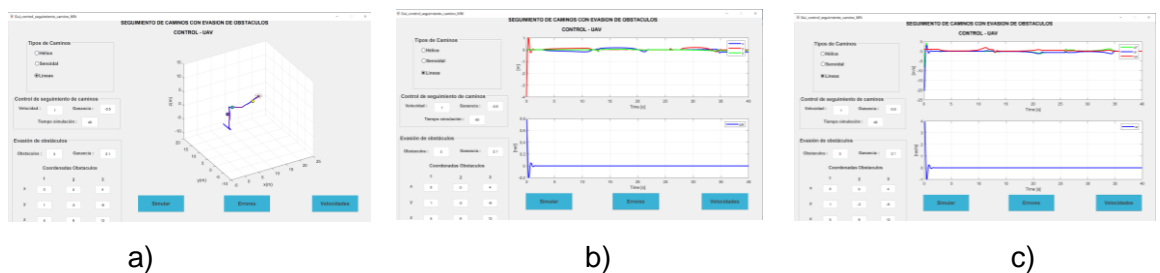
**Figura AIX. 28.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



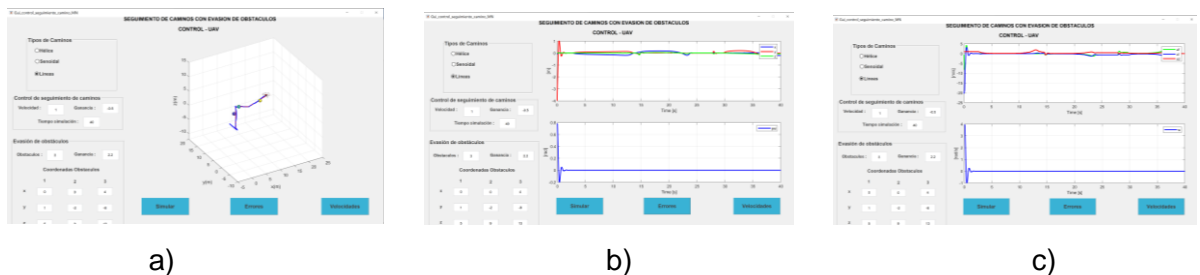
**Figura AIX. 29.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



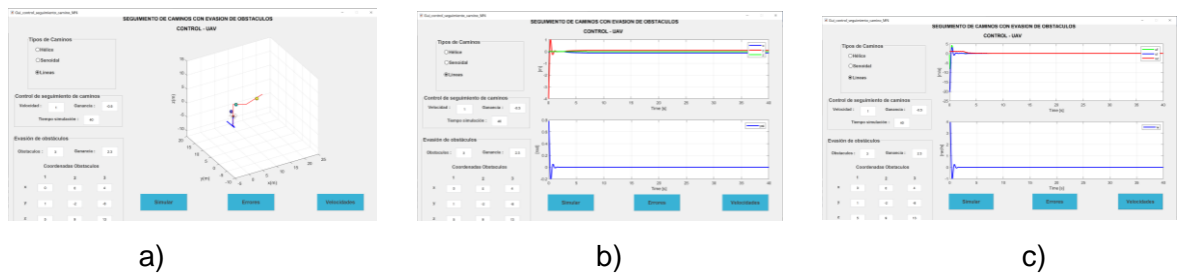
**Figura AIX. 30.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



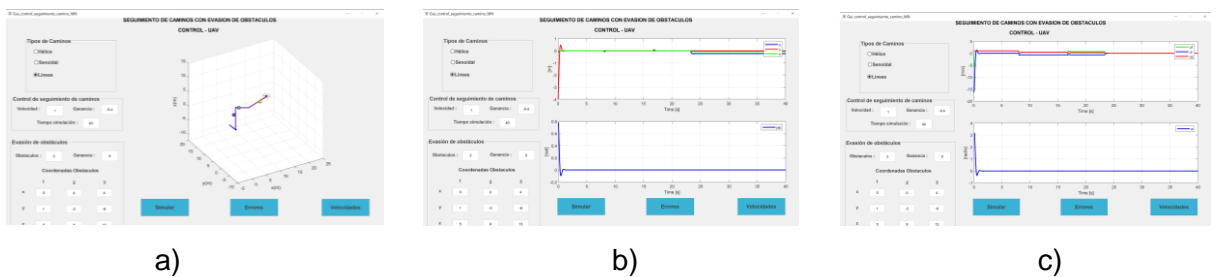
**Figura AIX. 31.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



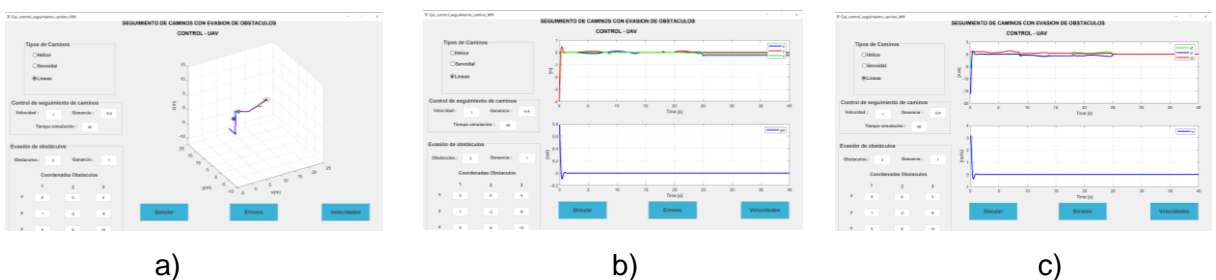
**Figura AIX. 32.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



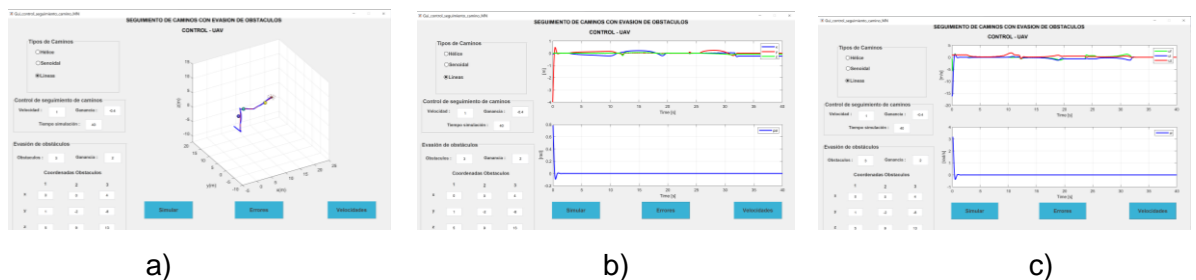
**Figura AIX. 33.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.5$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



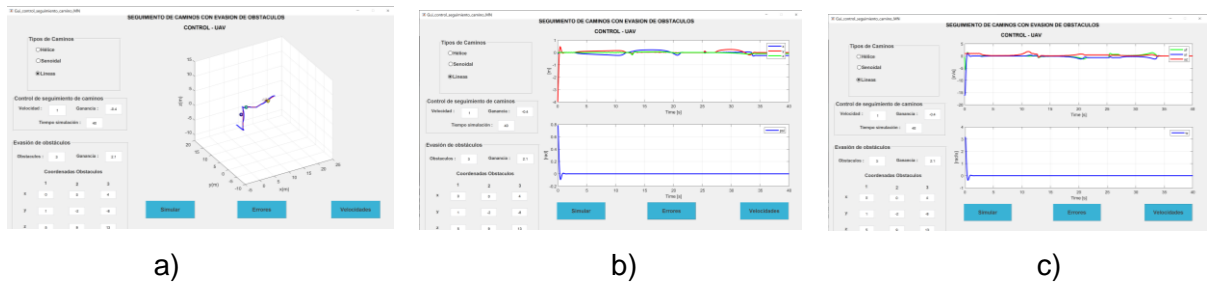
**Figura AIX. 34.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



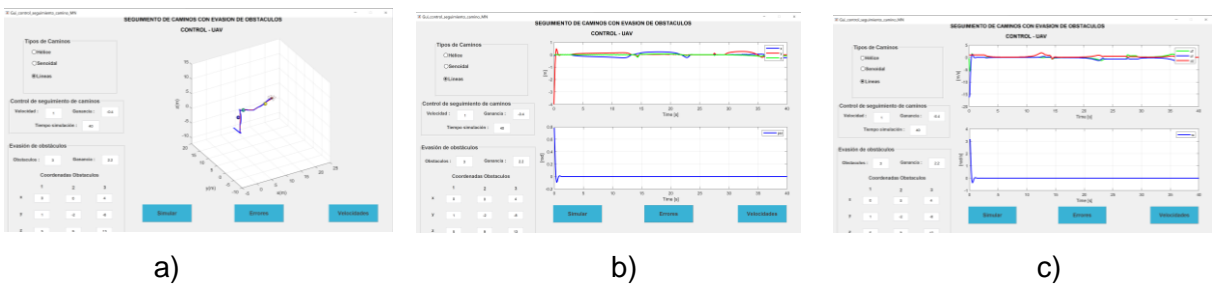
**Figura AIX. 35.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



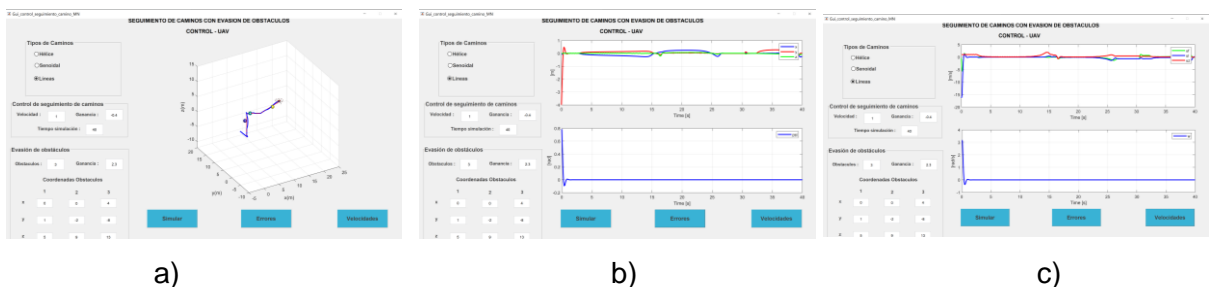
**Figura AIX. 36.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



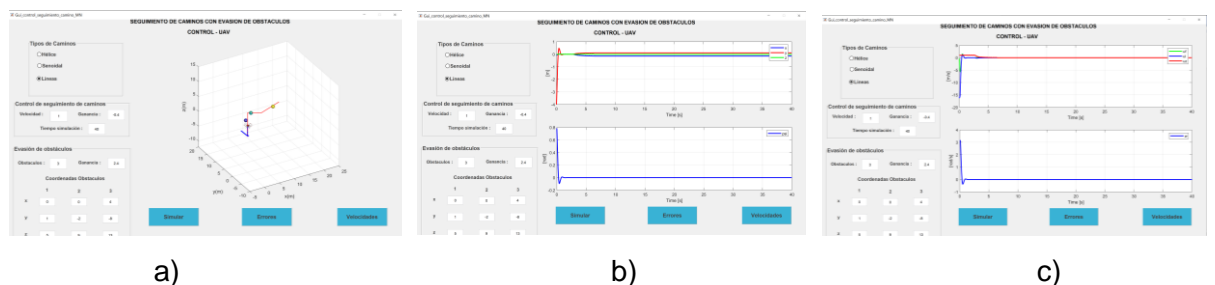
**Figura AIX. 37.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



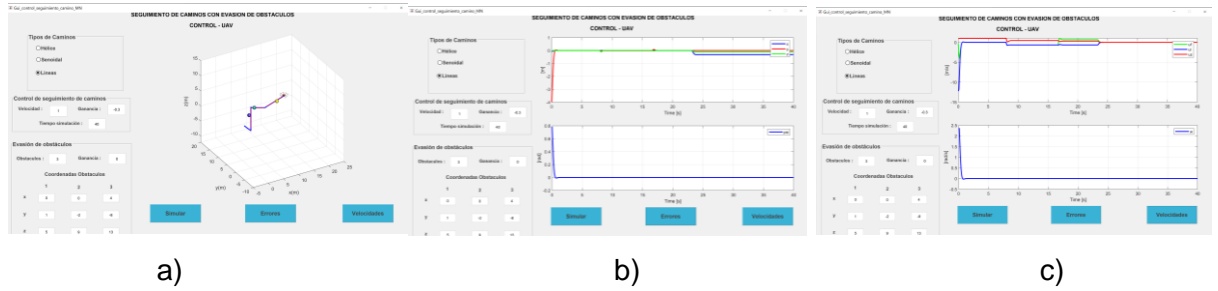
**Figura AIX. 38.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



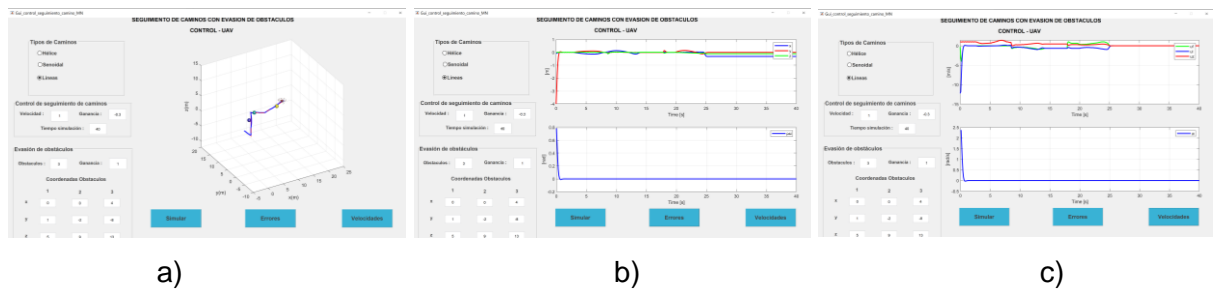
**Figura AIX. 39.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



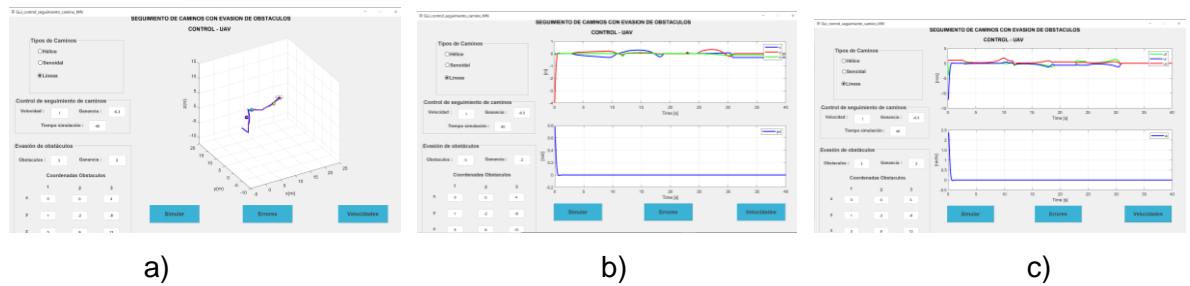
**Figura AIX. 40.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.4$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



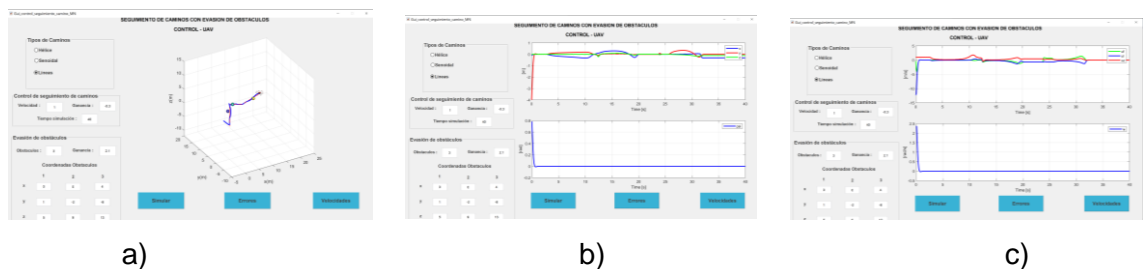
**Figura AIX. 41.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 42.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

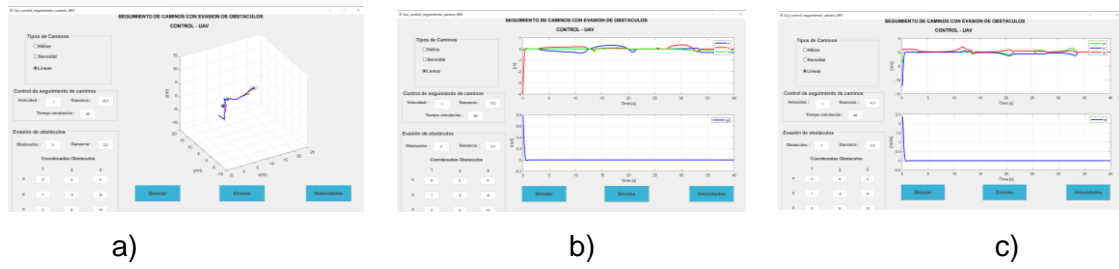


**Figura AIX. 43.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

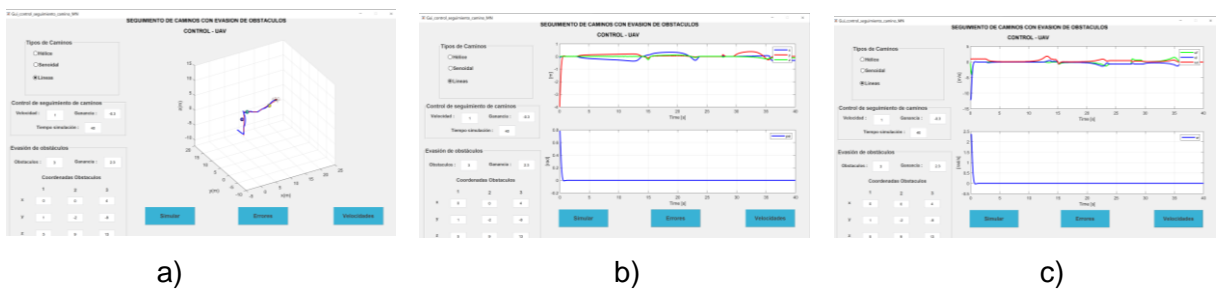


**Figura AIX. 44.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

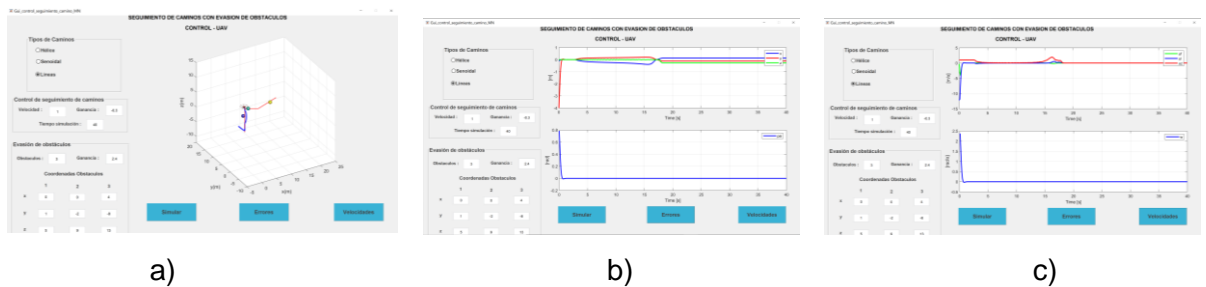




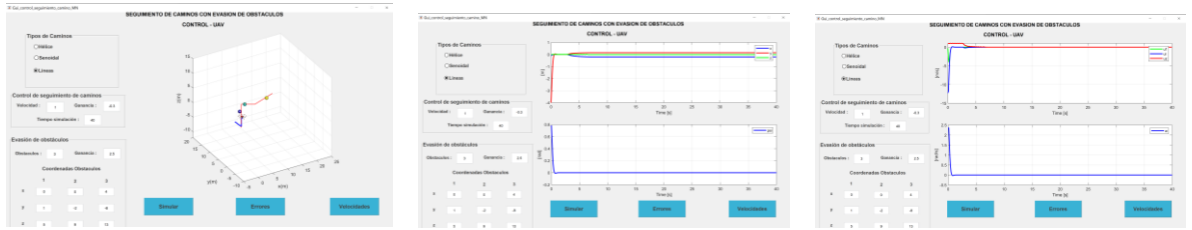
**Figura AIX. 45.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 46.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 47.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

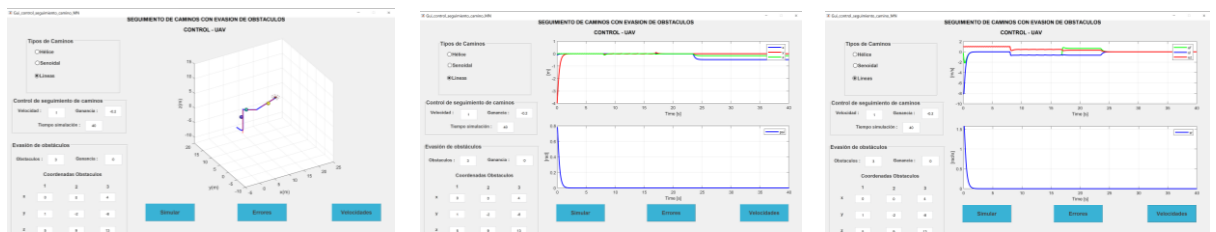


a)

b)

c)

**Figura AIX. 48.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.3$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

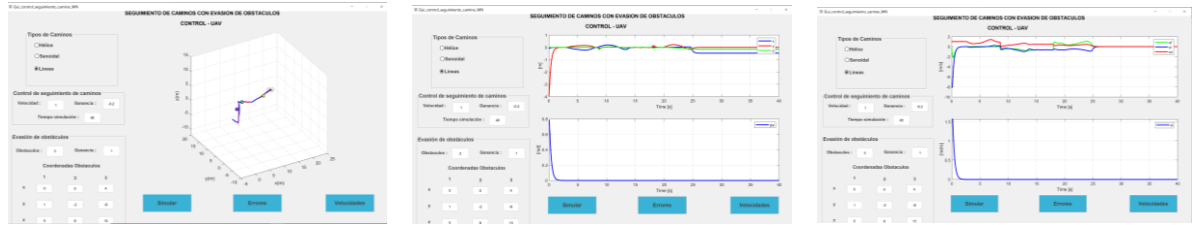


a)

b)

c)

**Figura AIX. 49.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

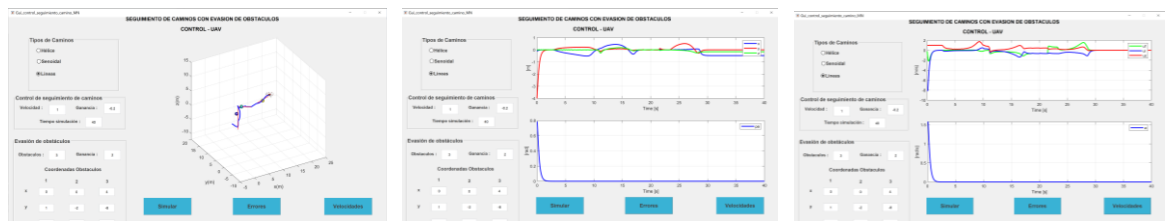


a)

b)

c)

**Figura AIX. 50.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

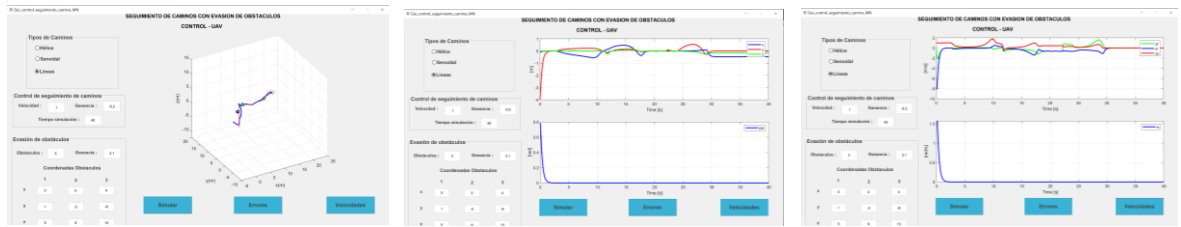


a)

b)

c)

**Figura AIX. 51.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

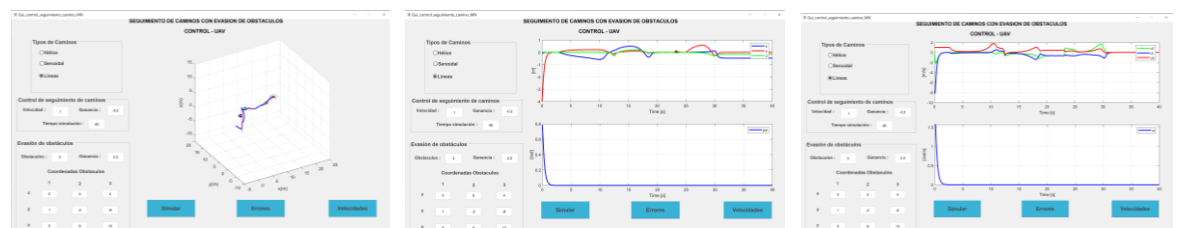


a)

b)

c)

**Figura AIX. 52.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

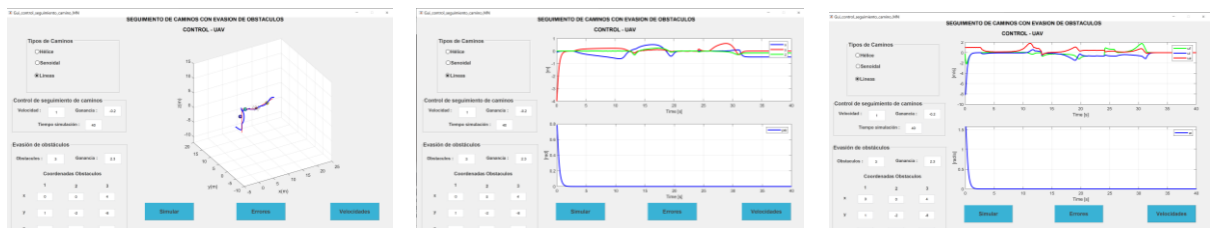


a)

b)

c)

**Figura AIX. 53.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

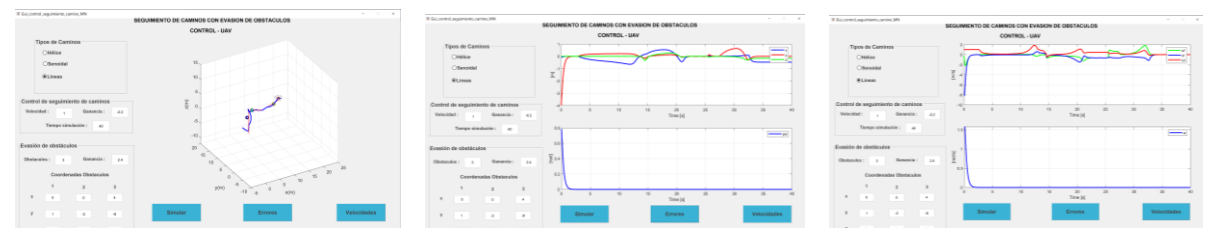


a)

b)

c)

**Figura AIX. 54.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

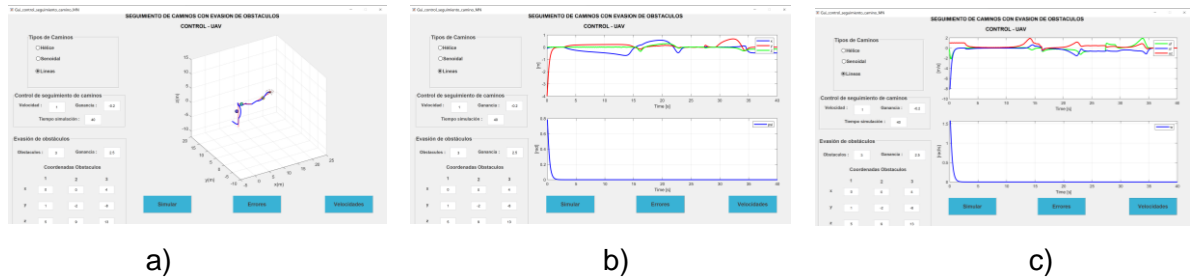


a)

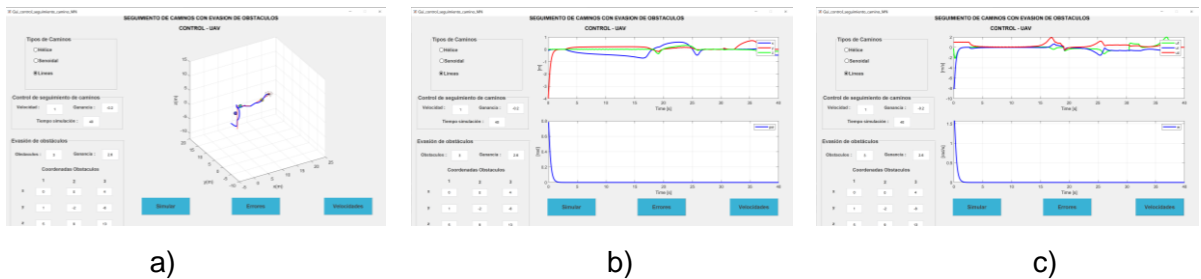
b)

c)

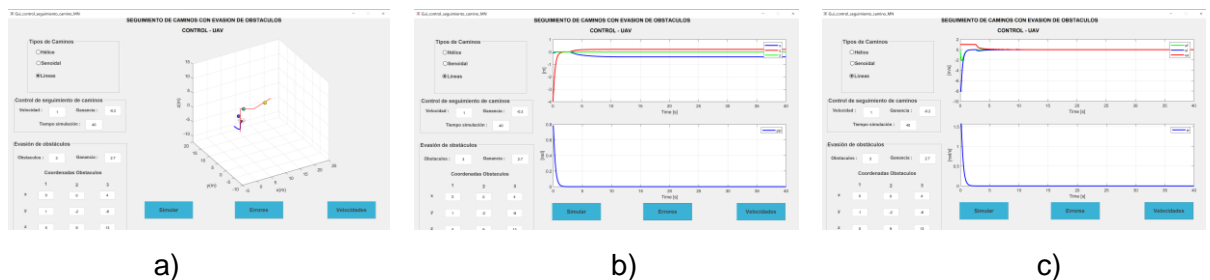
**Figura AIX. 55.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



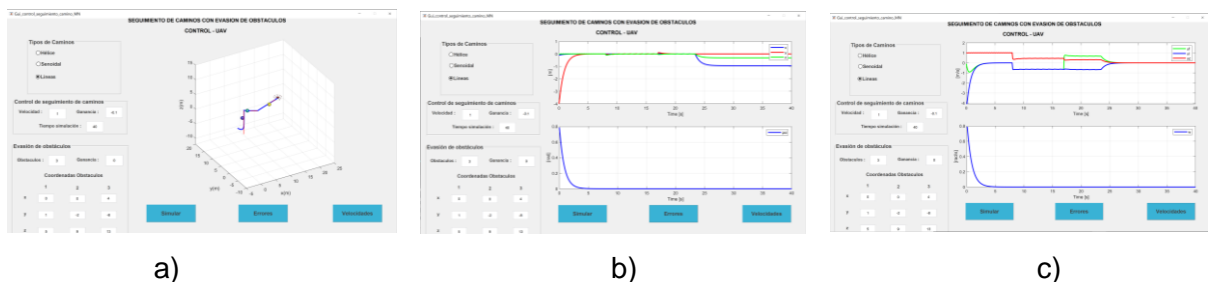
**Figura AIX. 56.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.5$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



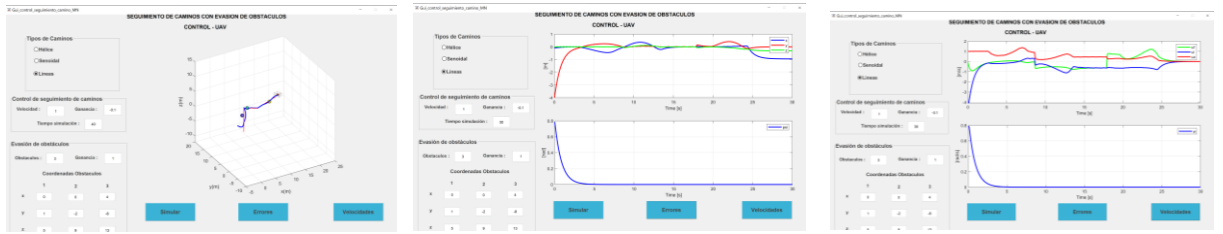
**Figura AIX. 57.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.6$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 58.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.2$  y  $Ganancia = 2.7$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 59.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 0$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

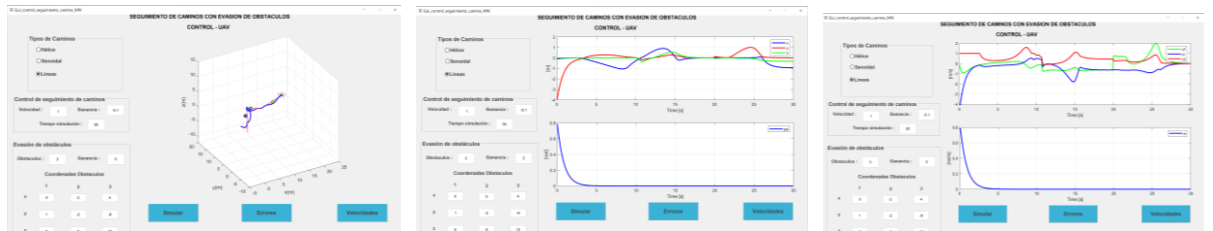


a)

b)

c)

**Figura AIX. 60.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

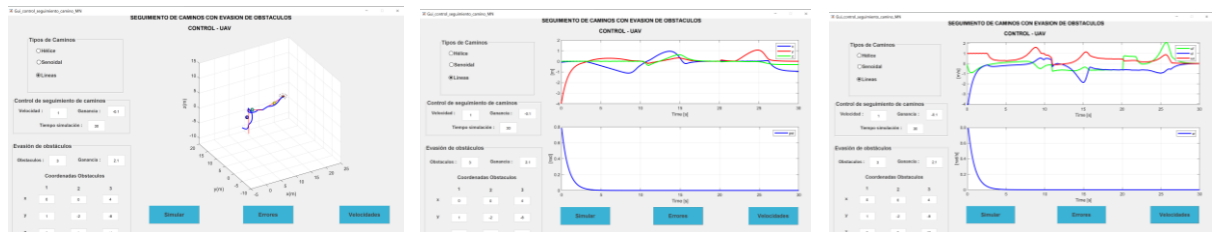


a)

b)

c)

**Figura AIX. 61.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

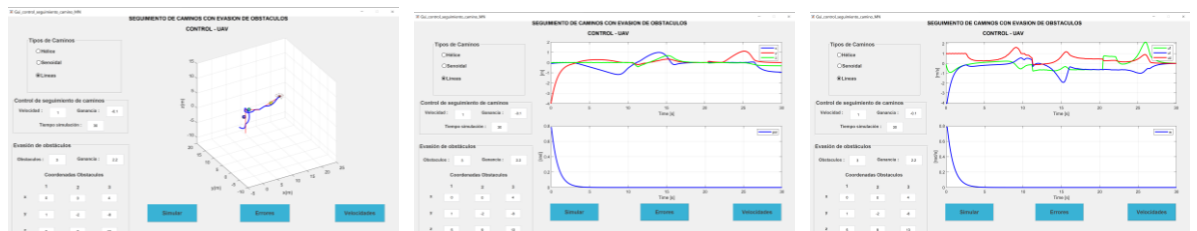


a)

b)

c)

**Figura AIX. 62.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 2.1$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

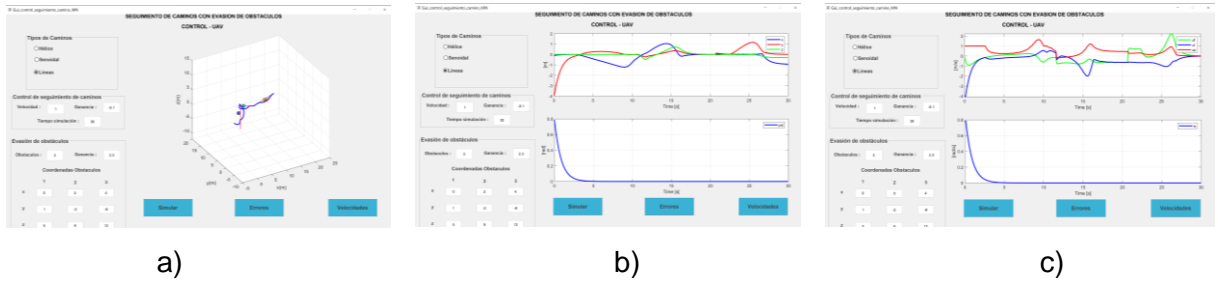


a)

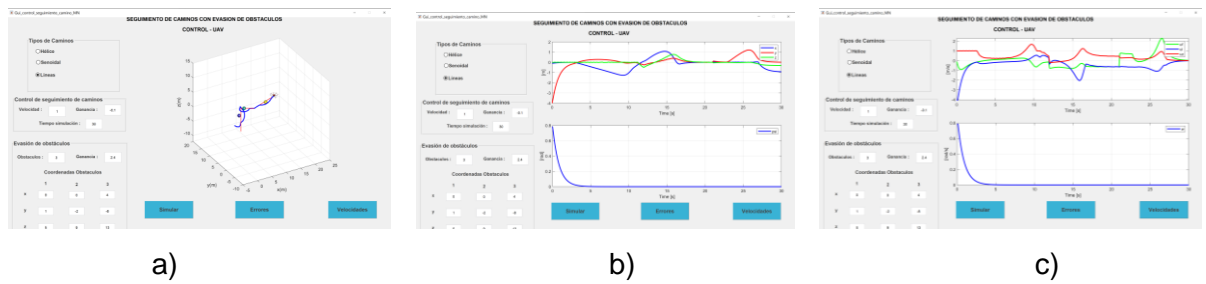
b)

c)

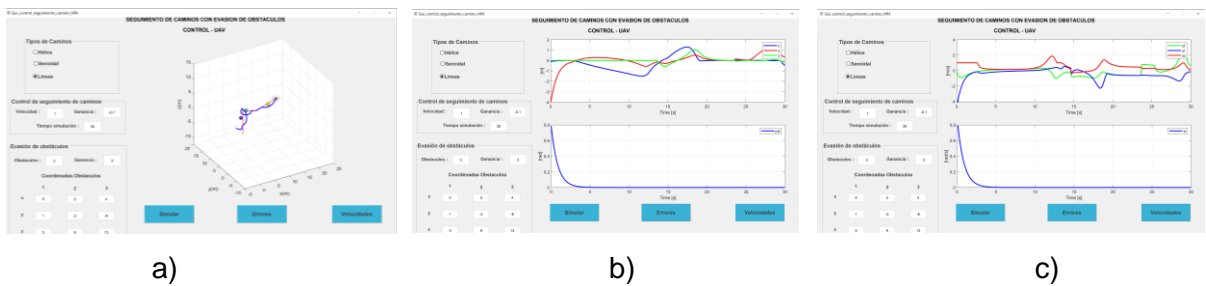
**Figura AIX. 63.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0, -2,9)$  y  $P_3 = (4, -8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 2.2$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



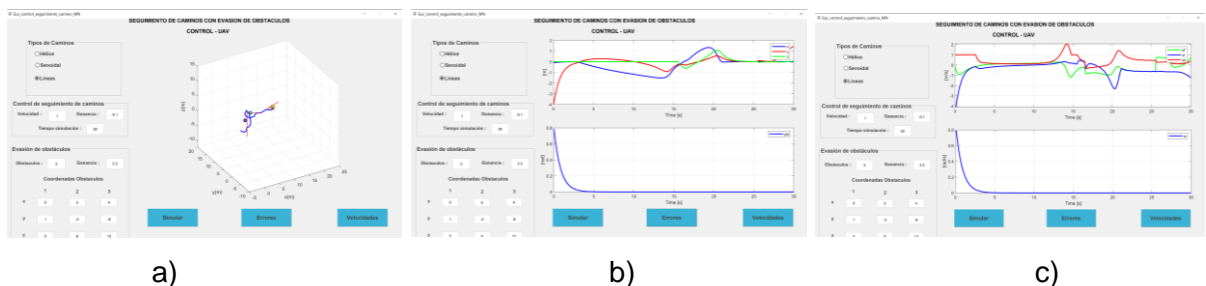
**Figura AIX. 64.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 2.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



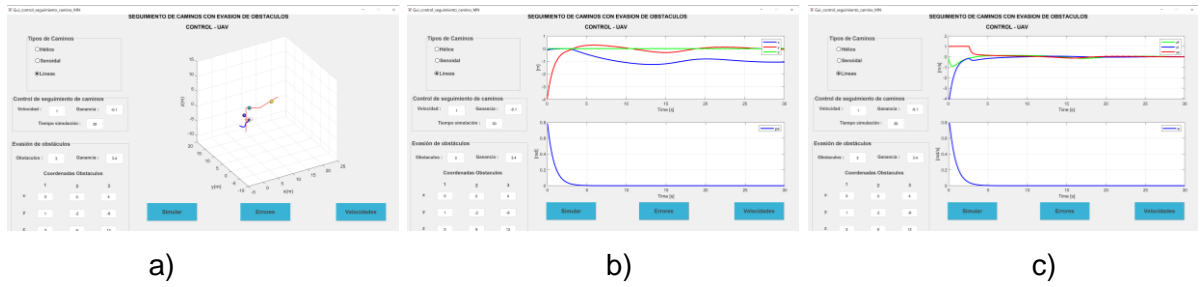
**Figura AIX. 65.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 2.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 66.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 67.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 3.3$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

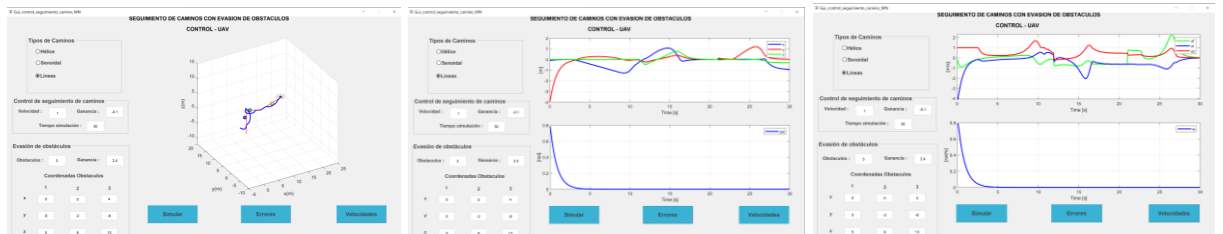


**Figura AIX. 68.** Control de seguimiento de camino Líneas, con 3 obstáculos en  $P_1 = (0,1,5)$ ,  $P_2 = (0,-2,9)$  y  $P_3 = (4,-8,13)$   $W = -0.1$  y  $Ganancia = 3.4$  a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

## ANEXO X

# COMPORTAMIENTO DEL CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINOS CON OBSTÁCULOS, CONSIDERANDO LA POSICIÓN DE LOS OBJETOS



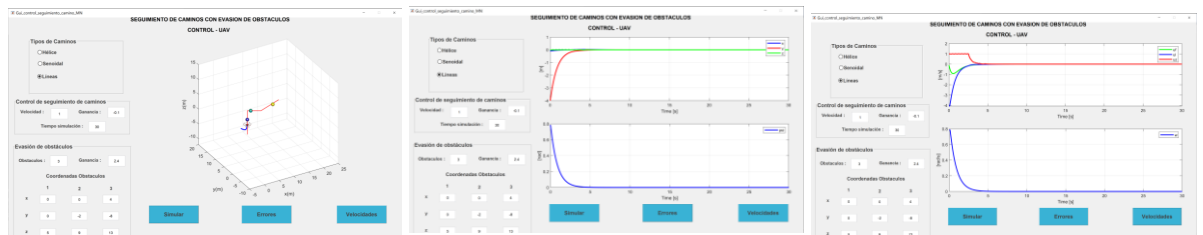


a)

b)

c)

**Figura AIX. 69.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado a un lado del camino a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

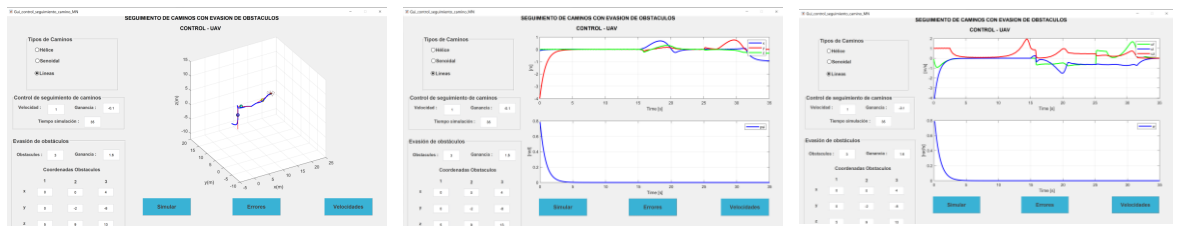


a)

b)

c)

**Figura AIX. 70.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

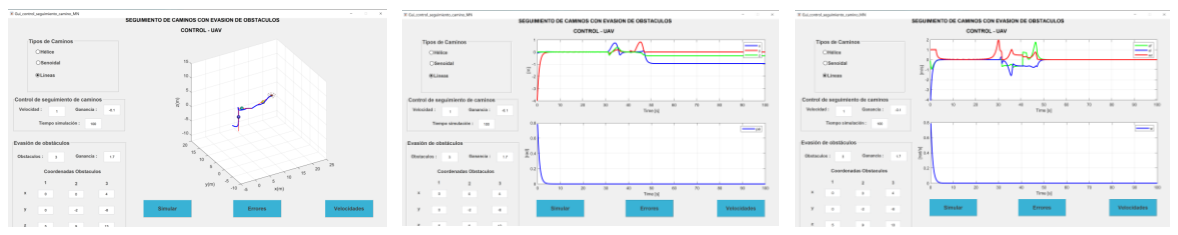


a)

b)

c)

**Figura AIX. 71.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto en el centro del camino a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

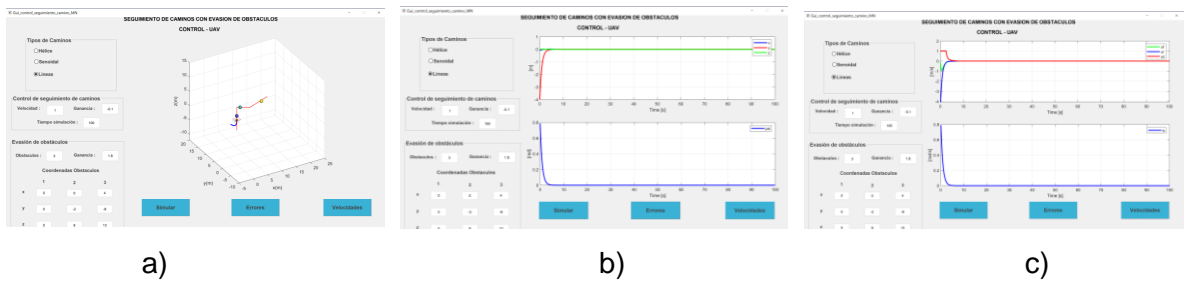


a)

b)

c)

**Figura AIX. 72.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino camino a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.



**Figura AIX. 73.** Control de seguimiento de camino Líneas, con el primer objeto ubicado en el centro del camino a) camino seguido por el dron, b) errores producidos en la simulación y c) variación de las velocidades de x, y, z e W.

ANEXO XI  
RESUMEN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL  
DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: HÉLICE CON  
 $-1 \leq W \leq -0.1$ .

**Tabla AXI. 1.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 5$  y  $W = -1$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-1	0	SI	22	24	24	3
-1	0.5	SI	21	25	24	3
-1	1	SI	21	25	25	3
-1	1.5	SI	20	18	15	3
-1	2	SI	10	12	11	3
-1	2.5	SI	10	21	14	3
-1	3	SI	5	12	5	3
-1	3.5	SI	10	5	7	3
-1	4	SI	2	2	7	3
-1	4.5	SI	2	0	9	3
-1	5	SI	2	0	3	3

**Tabla AXI. 2.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.9$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Número de objetos superados	Obj 3	
-0.9	0	SI	21	24	24	3
-0.9	1	SI	22	26	26	3
-0.9	2	SI	26	36	37	3
-0.9	2.1	SI	27	39	39	3
-0.9	2.2	NO	27	0	0	1
-0.9	2.3	NO	28	0	0	1
-0.9	2.4	NO	29	0	0	1
-0.9	2.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 3.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.8$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.8	0	SI	21	24	24	3
-0.8	1	SI	22	27	27	3
-0.8	2	SI	26	36	36	3
-0.8	2.1	SI	26	38	39	3
-0.8	2.2	NO	27	0	0	1
-0.8	2.3	NO	28	0	0	1
-0.8	2.4	NO	28	0	0	1
-0.8	2.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 4.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.7$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.7	0	SI	21	24	24	3
-0.7	1	SI	22	27	27	3
-0.7	2	SI	25	35	36	3
-0.7	2.1	SI	25	37	38	3
-0.7	2.2	NO	26	0	0	1
-0.7	2.3	NO	27	0	0	1
-0.7	2.4	NO	28	0	0	1
-0.7	2.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 5.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.6$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.6	0	SI	21	24	24	3
-0.6	1	SI	22	26	26	3
-0.6	2	SI	24	35	35	3
-0.6	2.1	SI	25	36	37	3
-0.6	2.2	SI	25	38	40	3
-0.6	2.3	NO	25	0	0	1
-0.6	2.4	NO	26	0	0	1
-0.6	2.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 6.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.6$  y  $W = -0.5$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.5	0	SI	21	24	24	3
-0.5	0.5	SI	21	24	25	3
-0.5	1	SI	22	26	26	3
-0.5	1.5	SI	22	29	29	3
-0.5	2	SI	23	33	34	3
-0.5	2.1	SI	23	34	35	3
-0.5	2.2	SI	23	36	37	3
-0.5	2.3	NO	23	0	0	1
-0.5	2.4	NO	24	0	0	1
-0.5	2.5	NO	24	0	0	1
-0.5	2.6	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 7.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.7$  y  $W = -0.4$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.4	0	SI	21	24	24	3
-0.4	1	SI	22	25	26	3
-0.4	2	SI	21	31	32	3
-0.4	2.2	SI	21	33	34	3
-0.4	2.3	NO	21	35	0	2
-0.4	2.4	NO	20	0	0	1
-0.4	2.7	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 8.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 3$  y  $W = -0.3$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.3	0	SI	21	24	24	3
-0.3	1	SI	21	26	26	3
-0.3	2	SI	19	28	29	3
-0.3	2.3	SI	17	29	30	3
-0.3	2.4	NO	16	30	0	2
-0.3	2.5	NO	15	0	0	1
-0.3	2.7	NO	14	0	0	1
-0.3	2.9	NO	12	0	0	1
-0.3	3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 9.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 4.5$  y  $W = -0.2$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.2	0	SI	21	24	24	3
-0.2	2	SI	12	22	24	3
-0.2	2.5	SI	5	18	19	3
-0.2	2.7	NO	0	17	17	3
-0.2	3	NO	0	14	0	2
-0.2	3.2	NO	0	0	0	1
-0.2	3.5	NO	0	0	0	1
-0.2	4	NO	0	0	0	1
-0.2	4.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXI. 10.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Hélice, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 16$  y  $W = -0.1$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	0	SI	21	24	24	3
-0.1	1	SI	15	22	23	3
-0.1	2	SI	0	10	10	3
-0.1	3	SI	0	0	0	3
-0.1	4	SI	0	0	0	3
-0.1	5	SI	0	0	0	3
-0.1	6	SI	0	0	0	3
-0.1	16	SI	0	0	0	3



## ANEXO XII

### RESUMEN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: SENOIDAL

CON  $-1 \leq W \leq -0.1$ .

**Tabla AXII. 1.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.2$  y  $W = -1$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-1	0	SI	23	24	7	3
-1	2	SI	31	18	0	3
-1	2.1	SI	31	22	0	3
-1	2.2	NO	20	0	0	0

**Tabla AXII. 2.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.4$  y  $W = -0.9$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.9	0	SI	24	24	20	3
-0.9	1	SI	26	25	23	3
-0.9	2	NO	35	30	0	2
-0.9	2.1	NO	37	31	0	2
-0.9	2.2	NO	40	32	0	2
-0.9	2.3	NO	45	33	0	2
-0.9	2.4	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 3.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.8$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.8	0	SI	23	24	20	3
-0.8	1	SI	26	25	23	3
-0.8	2	NO	36	30	0	2
-0.8	2.1	NO	38	31	0	2
-0.8	2.2	NO	42	32	0	2
-0.8	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 4.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.7$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.7	0	SI	23	24	21	3
-0.7	1	SI	26	26	23	3
-0.7	2	NO	36	30	0	2
-0.7	2.1	NO	38	30	0	2
-0.7	2.2	NO	41	31	0	2
-0.7	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 5.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.6$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.6	0	SI	24	24	21	3
-0.6	1	SI	27	26	23	3
-0.6	2	NO	35	29	0	2
-0.6	2.1	NO	37	29	0	2
-0.6	2.2	NO	39	0	0	2
-0.6	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 6.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.5$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.5	0	SI	24	24	21	3
-0.5	1	SI	26	25	24	3
-0.5	2	NO	34	28	0	2
-0.5	2.1	NO	36	29	0	2
-0.5	2.2	NO	37	29	0	2
-0.5	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 7.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.4$  y  $W = -0.4$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.4	0	SI	24	24	21	3
-0.4	1	SI	26	24	23	3
-0.4	2	NO	32	27	0	2
-0.4	2.1	NO	34	26	0	2
-0.4	2.2	NO	35	28	0	2
-0.4	2.3	NO	35	28	0	2
-0.4	2.4	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 8.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.3$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.3	0	SI	24	24	21	3
-0.3	1	SI	25	24	23	3
-0.3	2	NO	29	25	0	2
-0.3	2.1	NO	30	24	0	2
-0.3	2.2	NO	30	24	0	2
-0.3	2.3	NO	31	24	0	2
-0.3	2.4	NO	31	23	0	2
-0.3	2.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 9.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.2$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.2	0	SI	24	24	21	3
-0.2	1	SI	25	24	24	3
-0.2	2	NO	24	20	0	2
-0.2	2.1	NO	23	20	0	2
-0.2	2.2	NO	22	18	0	2
-0.2	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXII. 10.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 1.7$  y  $W = -0.1$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	0	SI	24	24	22	3
-0.1	1	SI	24	21	24	3
-0.1	1.2	SI	23	20	25	3
-0.1	1.4	SI	21	18	29	3
-0.1	1.6	SI	18	15	34	3
-0.1	1.7	SI	0	0	0	0

## ANEXO XIII

# RESUMEN DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: LÍNEAS CON $-1 \leq W \leq -0.1$ .

**Tabla AXIII. 1.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 4$  y  $W = -1$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-1	0	SI	5	3	8	3
-1	2	SI	5	2	9	3
-1	4	SI	5	2	9	3

**Tabla AXIII. 2.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.9$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.9	0	SI	13	24	24	3
-0.9	1	SI	12	26	24	3
-0.9	2	SI	11	36	29	3
-0.9	2.1	SI	11	39	29	3
-0.9	2.2	SI	12	41	31	3
-0.9	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 3.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.8$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.8	0	SI	15	24	24	3
-0.8	1	SI	13	26	24	3
-0.8	2	SI	12	35	28	3
-0.8	2.1	SI	12	38	29	3
-0.8	2.2	SI	11	40	30	3
-0.8	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 4.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.7$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.7	0	SI	13	23	24	3
-0.7	1	SI	13	26	24	3
-0.7	2	SI	11	34	28	3
-0.7	2.1	SI	11	36	29	3
-0.7	2.2	SI	11	37	30	3
-0.7	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 5.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.6$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.6	0	SI	13	23	24	3
-0.6	1	SI	12	26	24	3
-0.6	2	SI	10	33	27	3
-0.6	2.1	SI	10	35	27	3
-0.6	2.2	SI	10	37	29	3
-0.6	2.3	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 6.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.3$  y  $W = -0.5$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.5	0	SI	13	23	24	3
-0.5	1	SI	12	26	24	3
-0.5	2	SI	8	32	27	3
-0.5	2.1	SI	7	34	28	3
-0.5	2.2	SI	8	34	27	3
-0.5	2.3	NO	0	0	0	0



**Tabla AXIII. 7.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.4$  y  $W = -0.4$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.4	0	SI	13	23	24	3
-0.4	1	SI	10	26	24	3
-0.4	2	SI	6	30	25	3
-0.4	2.1	SI	5	31	25	3
-0.4	2.2	SI	3	33	25	3
-0.4	2.3	SI	2	34	26	3
-0.4	2.4	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 8.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.5$  y  $W = -0.3$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.3	0	SI	13	23	24	3
-0.3	1	SI	10	25	23	3
-0.3	2	SI	0	28	23	3
-0.3	2.1	SI	0	29	23	3
-0.3	2.2	SI	0	29	22	3
-0.3	2.3	SI	0	30	22	3
-0.3	2.4	NO	0	0	0	1
-0.3	2.5	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 9.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 2.7$  y  $W = -0.2$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.2	0	SI	13	24	24	3
-0.2	1	SI	6	25	22	3
-0.2	2	SI	0	24	19	3
-0.2	2.1	SI	0	23	18	3
-0.2	2.2	SI	0	24	17	3
-0.2	2.3	SI	0	23	17	3
-0.2	2.4	SI	0	26	16	3
-0.2	2.5	SI	0	22	15	3
-0.2	2.6	SI	0	22	14	3
-0.2	2.7	NO	0	0	0	0

**Tabla AXIII. 10.** Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 3.4$  y  $W = -0.1$ 

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	0	SI	14	24	23	3
-0.1	1	SI	0	23	20	3
-0.1	2	SI	0	12	8	3
-0.1	2.1	SI	0	10	7	3
-0.1	2.2	SI	0	8	5	3
-0.1	2.3	SI	0	6	2	3
-0.1	2.4	SI	0	0	0	3
-0.1	3	SI	0	0	0	3
-0.1	3.3	SI	0	0	0	3
-0.1	3.4	NO	0	0	0	0

## ANEXO XIV

### RESPUESTA DEL SISTEMA DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE CAMINO: LÍNEAS CON $w = -0.1$ Y EL OBJETO UBICADO EN EL CENTRO DEL CAMINO

Tabla AXIV.1. Número de colisiones del dron con los objetos del camino Senoidal, para  $0 \leq \text{Ganancia} \leq 4$  y  $W = -1$

W	Ganancia	Puede seguir el camino	Número de colisiones			Número de objetos superados
			Obj 1	Obj 2	Obj 3	
-0.1	1.6	SI	40	18	14	3
-0.1	1.7	SI	47	16	13	3
-0.1	1.8	NO	0	0	0	0