

CONTROL ALGORITHM USING LYAPUNOV STABILITY FOR TRAJECTORY FOLLOW-UP AND 3D POTENTIAL FIELDS IN OBSTACLE AVOIDANCE IN AN AERIAL ROBOT

Ryan Abraham León León¹, Cindy Nicoll Morera Quiroz², Daniela Estefany Carranza Inga³, Chantall Anabelén Paredes Cárdenas⁴

¹Universidad Privada del Norte, Perú, ryan.leon@upn.edu.pe

Abstract: Due to the high demand for aerial robots, it is essential to guarantee stable systems for the tasks assigned to these robots. Which is linked to control and stability; therefore, we talk about the design of optimal control algorithms. In this work, Lyapunov stability theory is used for trajectory tracking and three-dimensional potential field theory for obstacle avoidance. The Lyapunov candidate function was chosen in compliance with the requirements for the necessary stability, being necessary in the tracking of trajectories to saturate the speeds of the aerial robot and in the avoidance of obstacles, the theory of potential fields is applied, which builds a field potential with gradient therefore rejects obstacles. To demonstrate that there is an optimal algorithm that allows the aerial robot to follow trajectories in a stable way and avoid obstacles, we have compared the results with solutions implemented with controllers using numerical methods and implemented in reality and in simulation, seeing that the errors tend to zero from one quickly and their speeds are consistent with the reality of these robots. We have worked different test trajectories and we have had speeds in different ranges such as 5 m/s, -3.8 m/s and 7 m/s or 1.8 m/s and 2.2 m/s these speeds depend on the type of trajectory, as well as if it has obstacles, we can see all this in the figures of the work simulations, in the same way we can see the errors that tend to 0 m at different times 2 s, 6 s. The results of this research can be applied in the design of controllers for aerial robots, offering stable systems in the task assigned to the aerial robot.

Keywords: Algorithm, asymptotically stable system, Potential fields, Lyapunov stability, Differential direct kinematics.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.395>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

“ALGORITMO DE CONTROL USANDO ESTABILIDAD DE LYAPUNOV PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS Y CAMPOS POTENCIALES 3D EN LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS EN UN ROBOT AÉREO”

Ryan Abraham León León¹, Cindy Nicoll Morera Quiroz², Daniela Estefany Carranza Inga³, Chantall Anabelén Paredes Cárdenas⁴

¹Universidad Privada del Norte, Perú, ryan.leon@upn.edu.pe

Resumen: Debido a la alta demanda de robots aéreos, es fundamental garantizar sistemas estables para las tareas que se les asignen a estos robots. Lo cual está ligado al control y estabilidad por lo tanto hablamos del diseño de algoritmos de control óptimo. En este trabajo se utiliza la teoría de estabilidad de Lyapunov para el seguimiento de trayectorias y para la evasión de obstáculos la teoría de campos potenciales tridimensional. La función candidata de Lyapunov se escogió cumpliendo con los requisitos para la estabilidad necesaria, siendo necesario en el seguimiento de trayectorias hacer la saturación de las velocidades del robot aéreo y en la evasión de obstáculos se aplica la teoría de campos potenciales el cual construye un campo potencial con gradiente por ende rechaza los obstáculos. Para demostrar que se tiene un algoritmo óptimo que permite al robot aéreo seguir trayectorias de forma estable y evadir obstáculos hemos comparado los resultados con soluciones implementadas con controlares usando métodos numéricos e implementados en la realidad y en simulación viendo que los errores tienden a cero de una forma rápida y sus velocidades son acorde a la realidad de estos robots. Hemos trabajado diferentes trayectorias de prueba y hemos tenido velocidades en diferentes rangos como 5 m/s, -3.8 m/s y 7 m/s o 1.8 m/s y 2.2 m/s estas velocidades dependen del tipo de trayectoria, como también si tiene obstáculos, todo esto podemos verlos en las figuras de las simulaciones del trabajo, de la misma manera podemos ver los errores que tienden a 0 m en diferentes tiempos 2 s, 6 s. Los resultados de esta investigación pueden ser aplicados en el diseño de controladores para robots aéreos ofreciendo sistemas estables en la tarea asignada al robot aéreo.

Palabras claves: Algoritmo, Sistema asintóticamente estable, Campos potenciales, estabilidad de Lyapunov, Cinemática directa diferencial.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo vamos a hacer, que un robot aéreo realice dos tareas principales, seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos, aplicando la estrategia de Lyapunov, el propósito del trabajo es realizar un algoritmo de control para optimizar y dar mayor confiabilidad al vuelo de un robot aéreo en la misión que debe de cumplir. La importancia para las

aplicaciones a realizar es que este robot aéreo es autónomo no necesita ser tripulado o manejado a radio frecuencia para cumplir lo en comendado.

Los robots aéreos o vehículos aéreos no tripulados tienen una serie de características que nos da muchas ventajas sobre los vehículos tripulados, vemos que no necesitan piloto, podemos controlarlo de forma remota o este podría trabajar de forma automática, son más ligeros y sencillos [1] este tipo de control de forma automática es un área de investigación con gran interés debido a que el robot aéreo volara según lo programado previamente, usando sistemas de control complejos [2] en estos últimos años estos robots aéreos se han vuelto unos dispositivos cada vez más usados en todos los ámbitos en donde el hombre necesita realizar algún tipo de trabajo sea simple o peligroso aquí es donde le podemos dar un mayor uso evitando algún peligro para las personas [3] Pero como es que tendríamos éxito en las diferentes misiones a realizar por el robot aéreo, se dará en la medida que realicemos un perfecto diseño de un sistema de control automático eficaz y robusto, claro que según la misión a realizar vamos a obtener diferentes objetivos el cual pondrá a prueba nuestro diseño del controlador [4] estos robot aéreos no tripulados se muestran como una buena opción para diferentes aplicaciones pueden realizar trabajos en las plantas de producción de energía, petroquímicas y refinerías, inspección de líneas aéreas, plantas fotovoltaicas y termosolares, topografía aérea, inspección de obras civiles, seguridad vigilancia y rescate en caso de accidentes, catástrofes, inundaciones e incendios [5] estos robots aéreos son controlados por un microcontrolador bordo del robot, como también van toda una variedad de sensores tales como giroscopios, acelerómetros, cámaras de video, laser. Nos lleva a un fácil despegue tipo de vuelo estacionario y tener un aterrizaje vertical llevándonos a que estos cumplan con diferentes tipos de vuelo [6] el poder planificar nuestro trabajo a través de trayectorias nos permite una autonomía en el robot generando una disminución de usar robot aéreos guiados,

permitiendo tomar decisiones ante obstáculos y evadirlos si están en la trayectoria, al no contar con líneas puras no se tendría problema con los ángulos que se pueden generar entre estas [7] las trayectorias continuas nos llevan a generar los movimientos que va a realizar el robot aéreo sin necesidad de supervisión o control desde tierra, se puede controlar solo en tiempo real y el robot puede obtener datos del entorno en el que se encuentra, lo que si tenemos es que tener un controlador que de la estabilidad necesaria [8] Planificar trayectorias es generar una trayectoria que tiene una geometría según nuestro trabajo a realizar, se tiene un punto inicial y un punto final pasando por toda una serie de puntos espaciales los cuales están en la trayectoria ya definida, se tiene que tener en cuenta que la planificación de movimiento es necesario tomar una trayectoria geométrica considerando la cinemática y dinámica del robot aéreo autónomo[9] los robots aéreos constan de seis grados de libertad tres son rotaciones y tres traslaciones, los movimientos conocidos son alabeo, cabeceo y guiñada, si queremos cambiar la posición tenemos que cambiar las velocidades, si obtenemos velocidades adecuadas estas van a proporcionar un empuje equilibrado en sentido contrario a la gravedad, podremos volar a grandes distancias

[10] La cinemática en los robots aéreos es la encargada de describir el movimiento de este, sin considerar las fuerzas o perturbaciones que lo ocasionan, podemos considerar el punto de control en el centro del robot o lo podemos desplazar según nuestra necesidad, con la cinemática lo podemos considerar como un robot omnidireccional, sus movimiento son de forma lateral, frontal y en el eje Z por su característica de robot aéreo, a su vez tendremos las velocidades angulares en cada eje [11] usar la conocida teoría de campos potenciales es crear un campo potencial con un gradiente trabajando de tal forma que ira atractivamente al objetivo de control, como un robot aéreo en su trayectoria puede existir la presencia de obstáculos se tiene la necesidad de incluir una nueva tarea de control para evitar que los robots colisionen. Utilizar los campos potenciales en especial de tres dimensiones para el control o tarea de evasión de obstáculos define un área alrededor del robot aéreo restringiendo el movimiento cerca de los obstáculos para impedir una colisión [12] lo ideal es que los obstáculos y el robot aéreo se consideren cargas eléctricas, pero del mismo signo para poder trabajarlo de forma física, pues al tener el mismo signo se van a repeler [13] la teoría de Lyapunov nos garantiza la estabilidad de forma asintótica en el diseño de controladores para la tarea a cumplir como el seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos, utilizando esta estrategia de control mejora la técnica conocida y clásica de un controlador PID [14] el primer objetivo en la ingeniería de control es la estabilidad, las oscilaciones, robustez, rapidez, rechazo de perturbaciones y más carecen de sentido si nuestro controlador falla, los sistemas reales son no lineales y la teoría de Lyapunov destaca debido a que tiene las condiciones suficientes para lograrlo, pues existen múltiples definiciones de estabilidad teniendo un punto de equilibrio por lo que realizamos varias funciones candidatas para su solución [15]

Se trabajo con el modelo matemático de un cuadricóptero, el modelo cinemático, se obtiene la función candidata de Lyapunov para un sistema asintóticamente estable, se realiza el algoritmo de control de seguimiento de trayectoria con saturación de velocidades y evasión de obstáculos mediante campos potenciales.

En este trabajo tenemos como objetivo realizar un controlador con un algoritmo robusto que permita que el robot aéreo sea autónomo, pueda realizar dos tareas durante su misión, seguir cualquier trayectoria necesaria para la misión como también evadir obstáculos que se encuentran en la trayectoria, en este trabajo se podrá colocar hasta 3 obstáculos en la misma trayectoria. Si las metas son complejas nuestro algoritmo tiene que ser más robusto, por lo tanto, también se tiene como objetivo obtener una ganancia para el control de trayectoria optima, así como los errores de control y sus velocidades lineales para poder observar el mejor desempeño de vuelo del robot aéreo sea optimo y eficiente.

II. METODOLOGÍA

MODELO MATEMÁTICO DEL CUADRICÓPTERO: Para matemáticamente poder describir el movimiento del cuadricóptero, es fundamental determinar dos sistemas de referencia (ver Fig. 1), estos son:

- El sistema de referencia fijo en tierra, denominado $O_W = \{x_w, y_w, z_w, \varphi, \theta, \psi\}$.
- Encima del cuadricóptero y está ligado su centro de masa, denominado $O_B = \{x_B, y_B, z_B, p, q, r\}$.

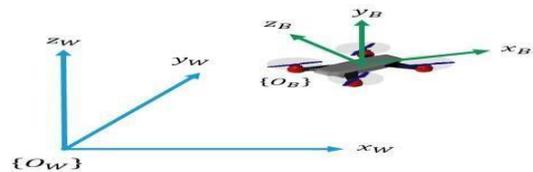


Fig. 1 Modelo matemático del cuadricóptero

MODELO MATEMÁTICO DEL ROBOT: Puede representar varias propiedades dinámicas y cinemáticas. Por lo tanto, cada modelo tendrá una utilidad diferente dependiendo del comportamiento que el usuario necesite observar (ver Fig. 2).

MODELO CINEMÁTICO: El cual se realiza mediante las siguientes ecuaciones puesta en la matriz (1) en donde encontramos las velocidades en x, en y, en z y la velocidad angular.

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{h}_z \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ u_z \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

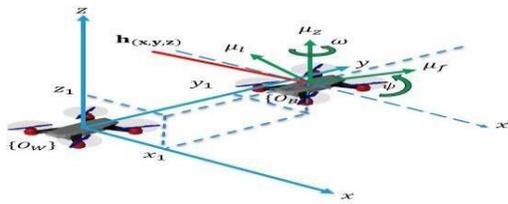


Fig. 2 Modelo matemático del robot

DISEÑO DE ALGORITMOS DE CONTROL: A través del sistema físico y su comportamiento esperado, se busca obtener una ley de control, para que el sistema de retroalimentación se comporte como se espera, y además resuelve el problema básico del control de movimiento.

El seguimiento de trayectoria tiene como objetivo que el robot alcance y siga una ruta parametrizada y límite de cero errores en el tiempo. Con este fin, cabe señalar que la teoría de la estabilidad de Lyapunov es una herramienta estándar y una de las más importantes en el análisis de sistemas no lineales y variables en el tiempo. Además, permite el análisis de la estabilidad del sistema de control y su aplicación como estrategia de diseño de controladores. El método tiene como objetivo encontrar una función de Lyapunov candidata, de esta manera se cumplen las condiciones y se asegura la estabilidad de su estado de equilibrio.

Trabajamos con los estados de equilibrio como puntos estacionarios, constantes o de reposo, mientras el sistema se ubica inicialmente en $\mathbf{x} = \mathbf{x}_e$, luego permanecerá en $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_e$ para todo tiempo $t > 0$. Si diseñamos controladores los estados vienen a ser el punto de equilibrio (es cero) y los errores por lo tanto los tendremos en cuenta.

FUNCIÓN CANDIDATA DE LYAPUNOV: Si la función $V(\mathbf{x})$ es una función de los estados \mathbf{x} (errores) será un sistema estable o asintóticamente estable siempre que cumpla con estas condiciones:

- $V(\mathbf{x}) \rightarrow$ Es continua y tiene derivadas continuas.
- $V(\mathbf{x}) = 0$ para $\mathbf{x} = 0$
- $V(\mathbf{x}) > 0$ para $\mathbf{x} \neq 0$

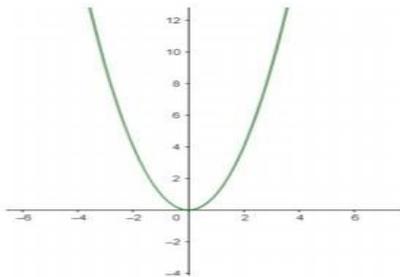


Fig. 3 Función candidata de Lyapunov

Visto nuestra función candidata (ver Fig. 3) y las condiciones (2) y (3) determinamos nuestro sistema como asintóticamente estable ya que alrededor de su punto de equilibrio en el origen si satisface las siguientes condiciones:

$$\frac{dV(x)}{dt} = 0 \text{ para } x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dV(x)}{dt} < 0 \text{ para } x \neq 0 \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que: Si $\mathbf{0} \rightarrow \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{0}$ cuando $t \rightarrow \infty$, se dice que el sistema es asintóticamente estable.

DISEÑO DE ALGORITMOS DE CONTROL: Al asignar una trayectoria de movimiento $\mathbf{h}(t)$ al punto que nos interesa en términos de $\dot{\mathbf{h}}(t)$ y al conocer las condiciones iniciales de posición y orientación. Pensando en el objetivo que podamos establecer las velocidades $\dot{\mathbf{q}}(t)$ que procee la trayectoria que le asignamos (4). Sabiendo que $\mathbf{m} = \mathbf{n}$, las velocidades de los motores las conseguimos gracias a trabajar la inversión de la matriz conocida como Jacobiana.

$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q}(t))^{-1} \dot{\mathbf{h}}(t) \quad (4)$$

Para la implementación se hará un sistema digital, como consecuencia tenemos que tener en cuenta que las velocidades que están en tiempo discreto $\dot{\mathbf{q}}(\mathbf{k})$ no coinciden con las $\dot{\mathbf{q}}(t)$ que están en tiempo continuo. Solucionamos el problema teniendo en cuenta el error entre la trayectoria deseada y la real.

Teniendo en cuenta, la derivada del error en nuestro robot aéreo:

$$\dot{\mathbf{h}}_e = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}} \quad (5)$$

Para diseñar nuestro controlador usaremos las formula del error (6) y (7) aplicando las siguientes formulas:

$$\dot{\mathbf{h}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}_e \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}_e) \quad (7)$$

Para el seguimiento de trayectorias podemos tener en consideración $\dot{\mathbf{h}}_d \neq \mathbf{0}$.

LEY DE CONTROL DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA:

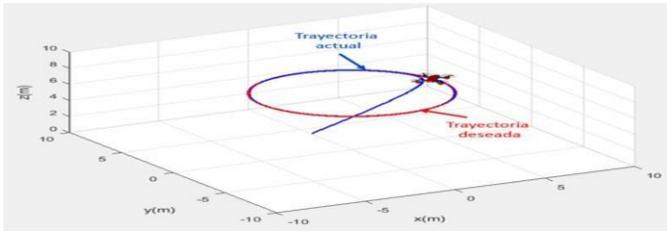


Fig. 4 Control de seguimiento de trayectoria

Podemos ver como se realizará el control del seguimiento de trayectoria (ver Fig. 4). En la aplicación del método de Lyapunov tenemos que realizar los pasos siguientes:

Primero, Tenemos que proponer la función candidata de Lyapunov (8), la cual es:

$$V(\mathbf{h}_e) = \frac{\mathbf{h}_e^T \mathbf{h}_e}{2} \quad (8)$$

Segundo, ya después se obtiene la primera derivada con relación al tiempo de la función (8), vamos a tener la ecuación (9).

$$\dot{V} = \mathbf{h}_e^T \dot{\mathbf{h}}_e \quad (9)$$

Tercero, muy importante encontramos la ecuación en lazo cerrado, de la ecuación del modelo general (10) y de la ley de

control de trayectoria (10).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}} &= \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (10) \\ \dot{\mathbf{q}}_{ref} &= \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}\mathbf{h}_e) \quad (11) \end{aligned}$$

Por último, para encontrar la ecuación en lazo cerrado se toma como que el seguimiento es perfecto de velocidad (12), nos quedaría la ecuación de lazo cerrado (13).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}}_{ref} &= \dot{\mathbf{q}} \quad (12) \\ \dot{\mathbf{h}} &= \mathbf{J}\mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}\mathbf{h}_e) \quad (13) \end{aligned}$$

Para poder trabajar la estabilidad necesitamos trabajar con las ecuaciones (14), (15) y (16) trabajadas en la estabilidad.

$$\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}\mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}\mathbf{h}_e) \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{h}}_e = \dot{\mathbf{h}}_d + \dot{\mathbf{h}}$$

$$\dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}_e = \dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}\mathbf{h}_e \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{h}}_e = -\mathbf{K}\mathbf{h}_e$$

$$\dot{V} = -\mathbf{h}_e^T \mathbf{K}\mathbf{h}_e < 0 \quad (16)$$

CONTROL DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA CON SATURACIÓN DE VELOCIDADES:

Para saturar las velocidades y que nuestro sistema sea aproximado a la realidad. obtendremos la ley de control (17) donde ingresamos la función tangente hiperbólica.

$$\dot{\mathbf{q}}_{ref} = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}\tanh(\mathbf{h}_e)) \quad (17)$$

Si la derivada de la función candidata es negativa (18) entonces vemos que si es considerada y el sistema cumplirá con la estabilidad, entonces nuestro controlador será estable.

$$\dot{V} = -\mathbf{h}_e^T \mathbf{K}\tanh(\mathbf{h}_e) < 0 \quad (18)$$

EVASIÓN DE OBSTÁCULOS MEDIANTE CAMPOS POTENCIALES: La teoría del campo potencial ayuda a construir campos potenciales en nuestro caso el campo es radial en todas las direcciones posibles. Cuando tenemos campos en 3D es centrada en $\mathbf{e}\mathbf{s}_0$ considerado un obstáculo. ξ es la posición del robot. \mathbf{r}_0 es el radio del obstáculo podemos ver la ecuación (19).

$$\phi_s(\xi, \mathbf{e}_0, \mathbf{r}_0, \lambda) = \frac{r_0^2}{(\xi - \mathbf{e}_0)^T(\xi - \mathbf{e}_0)} - \lambda(\xi - \mathbf{e}_0)^T(\xi - \mathbf{e}_0) \quad (19)$$

Donde:

λ → Acota el campo potencial a una distancia de seguridad para evitar que el robot aéreo golpee el obstáculo (20). se considera esta distancia de seguridad \mathbf{d} donde el robot empieza a sentir la presencia del obstáculo, por eso tener λ (21) el robot aéreo estará seguro.

$$\phi_s(\mathbf{d} + \mathbf{r}_0) = \frac{r_0^2}{(\mathbf{d} + \mathbf{r}_0)^2} - \lambda(\mathbf{d} + \mathbf{r}_0)^2 = 0 \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{r_0^2}{(\mathbf{d} + \mathbf{r}_0)^4} \quad (21)$$

Podemos ver (22) que fuera de la distancia de seguridad, el valor del campo potencial viene a ser nulo.

$$\phi_s = 0; \text{ si } \mathbf{d}_{obs} > \mathbf{d} + \mathbf{r}_0 \quad (22)$$

En donde:

\mathbf{d}_{obs} → Es la distancia entre el centro del obstáculo y el robot.

En la siguiente figura se muestra la forma radial que toma el campo potencial tridimensional como sus trayectorias tanto original como la trayectoria de evasión (ver Fig. 5).

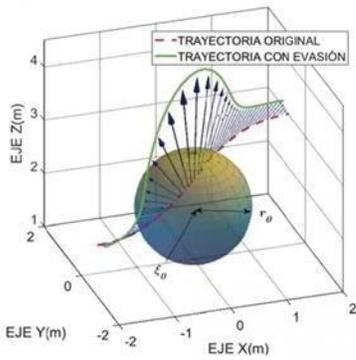


Fig. 5 Campo potencial para tres dimensiones

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALGORITMO

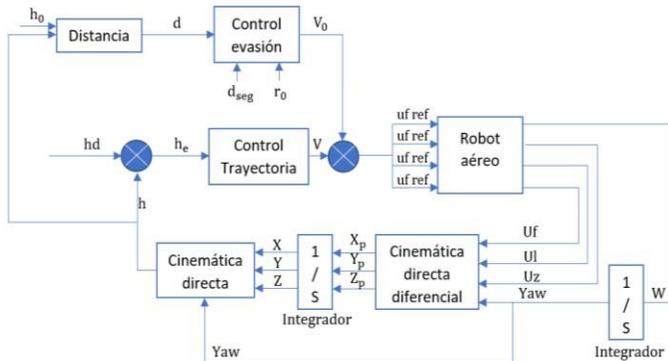


Fig. 6 Diagrama de bloques del Algoritmo

Donde:

$h_d = h$ deseado

$h_e = h$ error de posición y orientación h_x, h_y, h_z y Yaw

$V =$ Acción de control velocidad del controlador cinemático

$V_0 =$ Acción de control velocidad del controlador de obstáculos

$h_0 =$ Posición del obstáculo u objetos

$d =$ Distancia al obstáculo

$d_{seg} =$ Distancia de seguridad

$r_0 =$ Radio del obstáculo

$h =$ Posición y orientación del robot aéreo, h_x, h_y, h_z y yaw

$W =$ Velocidad angular

$U_f Ref, U_l Ref, U_z Ref, W Ref =$ Velocidades de referencias lineales

$U_f, U_l, U_z =$ Velocidades medidas

$Yaw =$ Ángulo de rotación en el eje z u orientación del robot

$X_p, Y_p, Z_p =$ Velocidades en el centro de masa del robot

$X, Y, Z =$ Posiciones en el plano del robot aéreo

Vemos el diagrama de bloques del funcionamiento de todo el sistema de control para el robot aéreo (ver Fig. 6). Iniciamos

con nuestro h_d el cual se va a restar con el h generando el error de posición y orientación del robot aéreo h_e siendo la entrada a nuestro control de trayectoria este es la tarea por realizar, a la salida obtenemos la acción de control velocidad del controlador cinemático V ya aplicado la estrategia de Lyapunov. Al conocer la posición del obstáculo h_0 y al conocer la posición y orientación del robot aéreo h se conoce la distancia a la que se encuentra el robot del obstáculo d , este ingresara al control de evasión, al conocer el radio del obstáculo r_0 el cual también es considerado y a su vez tenemos que considerar la distancia de seguridad d_{seg} , aplicando la estrategia de Lyapunov obtenemos la acción de

control de velocidad del controlador de obstáculos V_0 , en ambos casos la estabilidad será de forma asintóticamente estable. Podemos ver en el diagrama de bloques que V y V_0 ingresan a un sumador en cual nos da las velocidades de referencias lineales siendo las que ingresan al robot aéreo, gracias a esto tenemos las velocidades medidas y la velocidad angular al necesitar el ángulo de rotación en el eje z este pasara por un integrador generándonos el Yaw , las velocidades medidas y nuestro ángulo de rotación U_f, U_l, U_z y Yaw ingresaran a nuestra cinemática directa diferencial al ser derivadas obtendremos nuestras velocidades en el centro de masa del robot X_p, Y_p, Z_p al ingresar a un integrador vamos a obtener las posiciones en el plano del robot aéreo, ya obtenido X, Y, Z estos ingresaran a la cinemática directa con la orientación del robot Yaw para darnos la Posición y orientación h del robot aéreo de esta manera vamos a poder realizar el seguimiento de trayectorias con evasión de obstáculos aplicando la estrategia de Lyapunov.

III. RESULTADOS

Con la primera trayectoria circular después de analizar las ganancias para el seguimiento de trayectoria, colocamos una ganancia de trayectoria adecuada con valor 1, al observar que el robot aéreo llega a la trayectoria deseada de una forma suave vemos que es la correcta (ver Fig. 7).

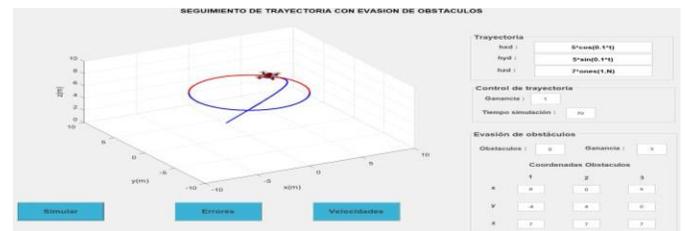


Fig. 7 Ganancia adecuada en trayectoria del robot

Al observar los resultados en las velocidades (ver Fig. 8). vemos que los errores tienen un comportamiento que tiende a la estabilidad convergiendo a cero y el error del ángulo de orientación también converge a cero, pero de una forma suave

y al observar la figura las velocidades medidas está en 5 m/s, -3.8 m/s y 7 m/s y la velocidad angular podemos ver que está en 0.8 rad/s pues estas velocidades están ajustadas a la realidad (ver Fig. 9).

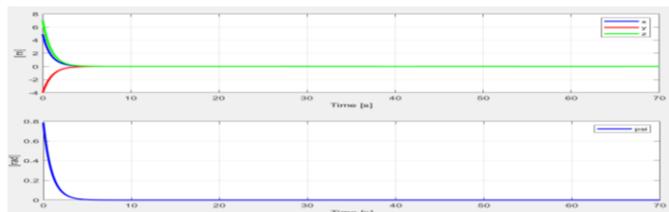


Fig. 8 Errores de trayectoria circular

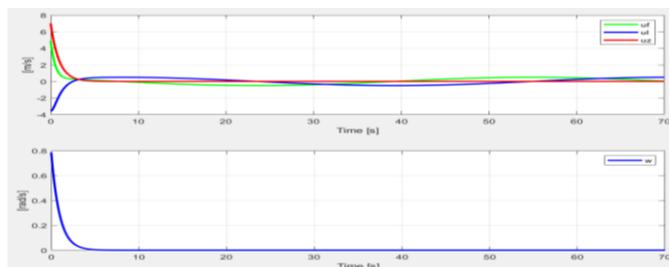


Fig. 9 Velocidad medida (m/s) y angular (rad/s) de trayectoria circular

Ahora tenemos la trayectoria circular con obstáculos (ver Fig. 10). Si la ganancia es pequeña no va a evadir los obstáculos y si la ganancia es grande esto hará que evada los obstáculos de forma brusca, generando inestabilidad en el sistema. Cuando se coloca una ganancia adecuada vemos que los saltos en los obstáculos tienen una curvatura perfecta, pues esto nos lleva a tener un sistema estable para cumplir las dos tareas.

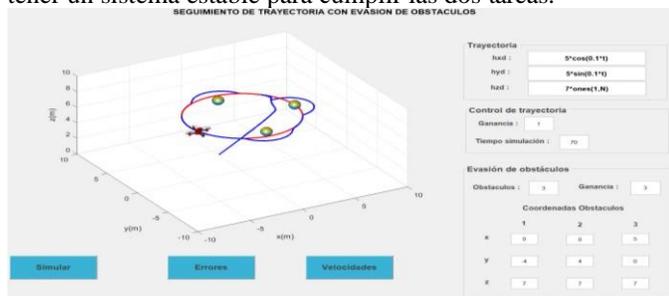


Fig. 10 Ganancia adecuada trayectoria circular

Al tener una ganancia adecuada para la evasión de obstáculos los errores tienden a ser menores (ver Fig. 11), vemos el error hze tiende a cero de forma estable y los errores hxe y hye tienden a ser menores en comparación cuando se tiene una ganancia alta. Los errores están en -1.7 m y 1 m, se observa esos cambios menos bruscos y su orientación no cambia.

Se puede observar que la velocidad en z ya no tiene inestabilidad al tratar de llegar a la altura deseada, la velocidad está dentro de los parámetros normales 0.8 rad/s al iniciar y tiende a cero, estos cambios de velocidad u_f y u_l en el robot

aéreo al evadir los obstáculos se genera una perturbación menor las velocidades están en 0.8 m/s y 1.8 m/s (ver Fig. 12).

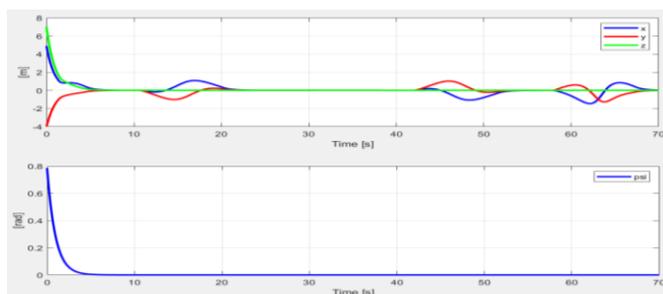


Fig. 11 Errores con ganancia adecuada en la evasión de obstáculos

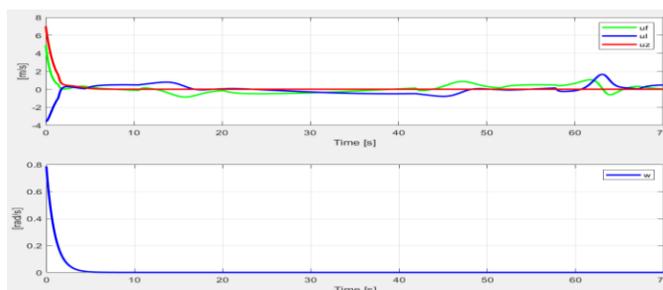


Fig. 12 Inestabilidad en la velocidad

Vamos a ingresar la segunda trayectoria, como se observa la trayectoria está dada por $h_{xd} = 7 \cdot \cos(0.1 \cdot t)$, $h_{yd} = 7 \cdot \sin(0.2 \cdot t)$ y $h_{zd} = 7 \cdot \text{ones}(1, N)$, en esta ya están las ganancias adecuadas para el control de trayectoria y para poder realizar la tarea de evasión de obstáculos, se puede observar que el robot aéreo sigue la trayectoria indicada y puede evadir los obstáculos sin problemas, el robot aéreo trabaja asintóticamente estable (ver Fig. 13).

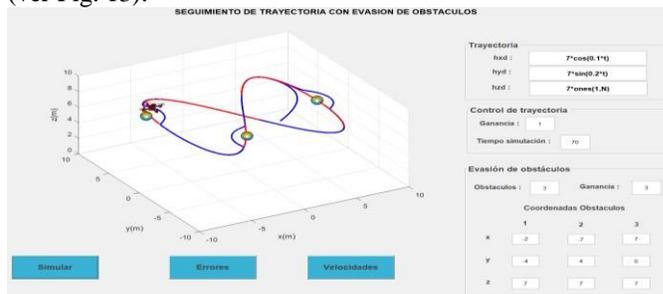


Fig. 13 Segunda trayectoria con obstáculos

Vemos que los errores h_{xe} y h_{ye} son mínimos -1 m y 0.8 m, nuestro h_{ze} tiende a cero de error, como también podemos ver nuestro ángulo Yaw_e tiende a cero, es decir el robot aéreo en menos de 3 segundos ya está orientado (ver Fig. 14). Si vemos las velocidades justo cuando llega a los obstáculos existe una variación en sus velocidades, pero pequeñas es por eso que el robot aéreo no sale de su estabilidad. Las velocidades u_f y u_l tienen unas variaciones de -2 m/s y 2.4 m/s y la velocidad angular es adecuada 0.8 rad/s y tiende a cero en menos de 3.5 segundos (ver Fig. 15).

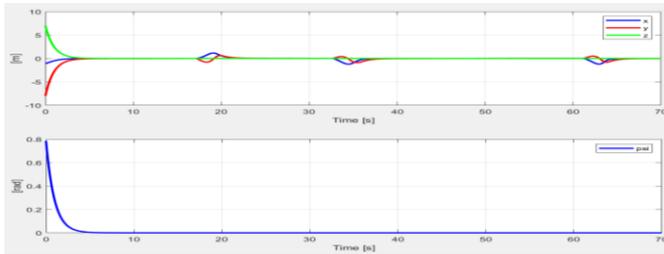


Fig. 14 Errores de segunda trayectoria con obstáculos

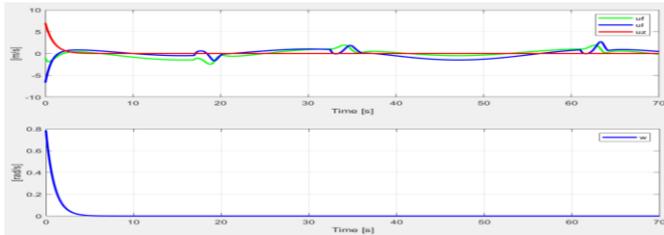


Fig. 15 Variación en las velocidades segunda trayectoria con obstáculos

Podemos ver que el algoritmo de control que genera autonomía del robot aéreo es robusto, se cumplió con ver el trabajo de las dos tareas a realizar por el robot aéreo sigue la trayectoria dada y evade hasta 3 obstáculos que están cerca o en la misma trayectoria. se prueba con varias trayectorias y en todas se tiene éxito por lo tanto se determina la robustez de nuestro algoritmo, las ganancias en nuestro control tienen valores de 1,2 y 3 siendo muy adecuados para la tarea del robot aéreo. se ven las velocidades lineales y los errores siendo estos adecuados y reales para un desempeño óptimo y eficiente cuando se tiene que realizar las tareas encomendadas al robot aéreo de forma autónoma.

IV. DISCUSIÓN

En el artículo Control no lineal del manipulador aéreo Robots basados en métodos numéricos [16] tenemos un robot aéreo que fue probado de forma real y este obtuvo resultados satisfactorios en el seguimiento de la trayectoria, obteniendo errores muy cercanos a cero y velocidades adecuadas y reales para un robot aéreo (ver Fig. 16).

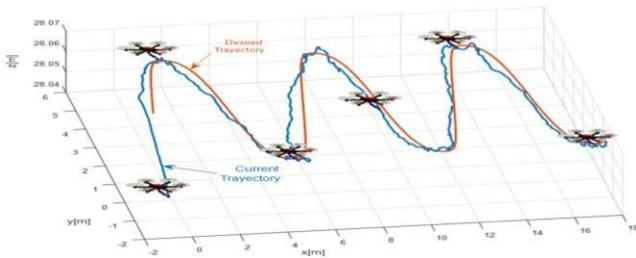


Fig. 16 Primera trayectoria del robot aéreo
Fuente: GRIJALVA (2020)

Los errores son muy pequeños llegando a un máximo de 2.5 m y tendiendo a 0 m después de unos 20 segundos, También las velocidades que son pequeñas de 1.2 m/s como máximo debido a que el tiempo para llegar a seguir la

trayectoria es de 20 segundos a 25 segundos por lo tanto el sistema puede alcanzar la estabilidad sin necesidad de tener velocidades altas. Por lo tanto, el controlador que usa métodos numéricos es aceptable y fue probado dejando un buen controlador.

En nuestro caso hemos tomado la misma trayectoria, nuestro controlador es realizado con la estabilidad de Lyapunov (ver Fig. 17). Son las mismas condiciones iniciales del artículo Control no lineal del manipulador aéreo Robots basados en métodos numéricos, al ajustarle la ganancia del control de trayectoria a 0.5 podemos observar que los errores tienden a 0 y se estabilizan en solo 6 segundos aproximadamente y no en 20 segundos aproximadamente como en el artículo Control no lineal del manipulador aéreo Robots basados en métodos numéricos, esto nos dice que nuestro sistema llega más rápido a la estabilidad (ver Fig. 18).

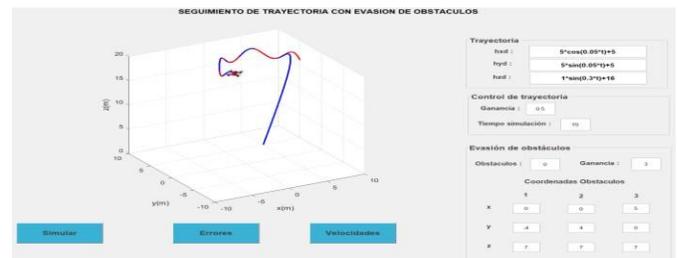


Fig. 17 Trayectoria discusión

Los errores tienden mucho más rápido a 0 m, de la misma forma la orientación deseada. Las velocidades que se imprimen al robot aéreo son mayores que aquellas que fueron aplicadas en el robot aéreo del artículo Control no lineal del manipulador aéreo Robots basados en métodos numéricos, se necesitan motores con una mayor potencia el cual solo es necesario para el despegue ya que después el sistema está estable, podemos dar más tiempo para la estabilidad y reducir la potencia de los motores como opción para el sistema.

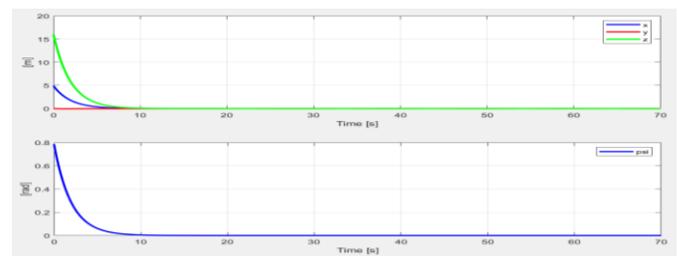


Fig. 18 Errores en primera trayectoria discusión

Nuestro sistema con Lyapunov no solo se estabiliza más rápido, sino que también evade obstáculos sin problemas de forma automatizada, teniendo más ventaja para cualquier tarea del robot aéreo necesite realizar (ver Fig. 19).

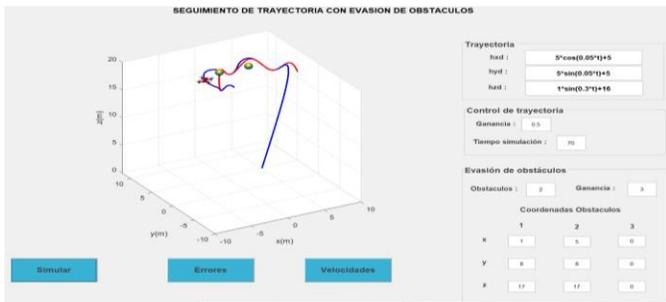


Fig. 19 Trayectoria y evasión de obstáculos primera discusión

Si vemos los errores del sistema con el controlador con estabilidad de Lyapunov en el momento que evade un obstáculo en nuestro caso el más complicado para el robot aéreo vemos que se sale de la estabilidad generando un error pequeño de -1.5 m aproximadamente y regresa de manera inmediata nuestro controlador mantiene el sistema estable siguiendo la trayectoria que se le asignó y estable en toda la trayectoria (ver Fig. 20).

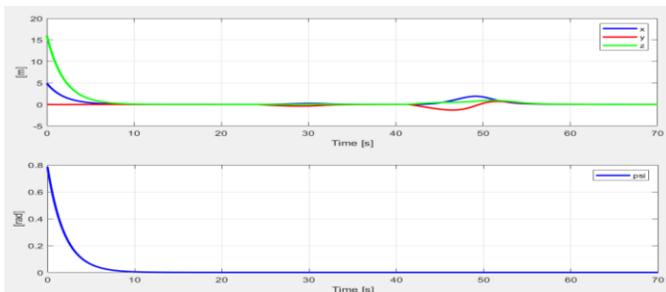


Fig. 20 Error evasión de obstáculo en primera trayectoria discusión

En el artículo denominado seguimiento de trayectoria de un mini-helicóptero de cuatro rotores basado en métodos numéricos [17], vemos que la simulación solo fue realizado en el eje X desde -1 a 1 metros, en el eje Y desde -1 a 1 metros y en el eje Z de 0 a 1.5 metros llegando a observar que no se necesita velocidades altas para poder llegar a los puntos máximos de la trayectoria, a su vez se puede ver que el controlador basado en métodos numéricos si es estable y robusto (ver Fig. 21).

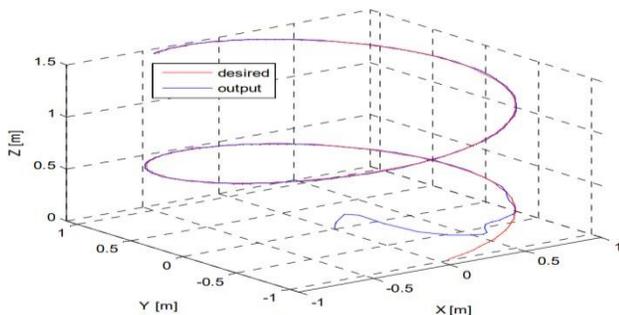


Fig. 21 Segunda trayectoria del robot aéreo
Fuente: ROSALES (2011)

Vemos que los errores tienden a cero en todos sus ejes y como no tiene que recorrer más de 1.5 metros se puede llegar

de una forma rápida con velocidades pequeñas. Podemos ver claramente que se cumple con lo indicado en el artículo seguimiento de trayectoria de un mini-helicóptero de cuatro rotores basado en métodos numéricos.

Nuestro controlador basado en la estabilidad de Lyapunov es aplicado a una trayectoria de tipo helicoidal y nuestras distancias son mucho mayores de hasta 15 metros por lo tanto vamos a usar motores de mayor potencia, aumentando la velocidad del robot aéreo. Podemos ver que en 2 segundos los errores tienden a cero, esto nos lleva a ver que el controlador es robusto y estable a la vez, vemos que las velocidades no son tan altas esta entre (-3.5 a 3.5) m/s viendo que tenemos velocidades adecuadas y reales para una implementación.

Importante nuestro controlador cumple con la tarea de evadir obstáculos que estén cerca o en la misma trayectoria (ver Fig. 22). Se tiene dos obstáculos en donde el controlador responde de manera adecuada cumpliendo la tarea de evasión, vemos que los errores van a cero metros, y justo donde están los obstáculos el controlador al evadirlos se sale de la trayectoria y rápido regresa a la estabilidad (ver Fig. 23). Las velocidades adecuadas las cuales no pasan de (-4 a 4) m/s para estas distancias mucho mayores al del artículo seguimiento de trayectoria de un mini-helicóptero de cuatro rotores basado en métodos numéricos (ver Fig. 24). Los errores de orientación tienden a cero de forma rápida y su velocidad de rotación es la adecuada.

Es importante resaltar que, de los artículos vistos, los controladores trabajan muy parecidos con nuestro controlador de Lyapunov en el seguimiento de trayectorias, aparte nuestro controlador de seguir cualquier trayectoria dada también va a tener autonomía en evadir obstáculos generando que nuestro controlador tenga mayores prestaciones.

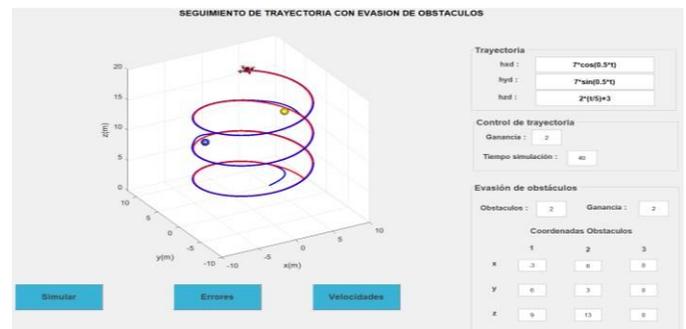


Fig. 22 Trayectoria y evasión de obstáculos segunda discusión

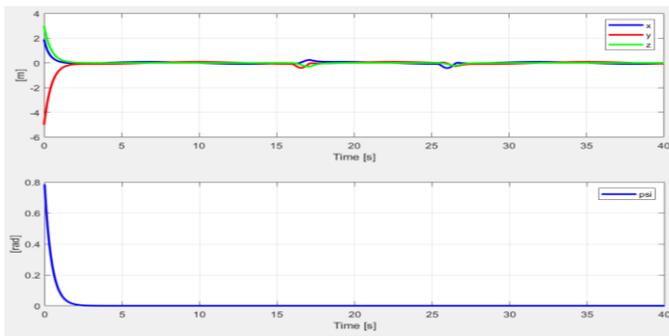


Fig. 23 Errores evasión de obstáculos segunda discusión

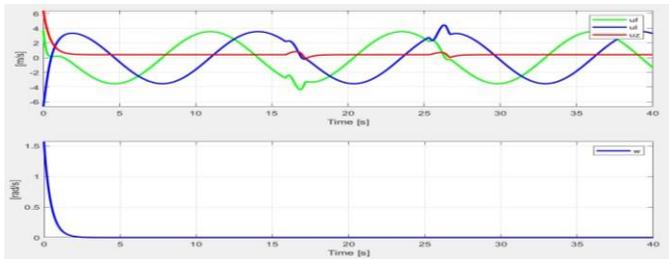


Fig. 24 velocidades evasión de obstáculos segunda discusión

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó la teoría de estabilidad de Lypunov para el algoritmo que permite al robot aéreo ser autónomo en seguir trayectorias y campos potenciales para evadir obstáculos.

Los resultados obtenidos en la simulación nos permiten ver que tenemos un controlador robusto el cual puede seguir diferentes tipos de trayectorias para cualquier tarea del robot aéreo y también puede evadir los obstáculos que se encuentran en la trayectoria o cerca de ella con un máximo de tres obstáculos para la simulación. Hemos visto que los errores siempre tienden a cero de una forma rápida y las velocidades son pequeñas considerándose reales.

El algoritmo es robusto y puede ajustarse para trayectorias complejas, obteniendo buenos resultados ya vistos, cambiando las ganancias para el seguimiento de trayectorias, así cambiando también la ganancia para la evasión de obstáculos quedando un algoritmo óptimo.

Los resultados de este trabajo demuestran que es posible que el robot aéreo realice seguimiento de cualquier trayectoria, sea en simulación o sea cargado para un robot real, donde tenga que seguir trayectorias definidas y en esta exista obstáculos. Haciendo que su trabajo sea óptimo.

REFERENCIAS

[1] GARCÍA-AUNON, P., et al. Aplicaciones practicas de los sistemas multi-UAV y enjambres aéreos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 2021, vol. 18, no 3, p. 230-241, doi: 10.4995/riai.2020.13560.

[2] JAIMES, Luis Eduardo García; GIRALDO, Maribel Arroyave. Control predictivo del movimiento longitudinal y latero-direccional de una aeronave no tripulada. *Revista Politécnica*, 2019, vol. 15, no 29, p. 45-54., doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n29a4>.

[3] GHERSIN, A. S., et al. Control robusto H-infinito para la velocidad de desplazamiento de un UAV en base a estimación de flujo óptico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 2021, vol. 18, no 3, p. 242-253, doi: 10.4995/riai.2021.14370.

[4] ANDALUZ ORTIZ, Gabriela Magdalena. Modelación y control predictivo de un robot móvil con centro de masa desplazado. 2018. Disponible: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/8310>.

[5] CABRERA PEÑA, José María, et al. Revisión tecnológica, normativa y aplicaciones de los UAV en la ingeniería (parte 2). *Dyna (Bilbao)*, 2016. Disponible: https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/42432/2/Revisi%C3%B3n_tecnol%C3%B3gica.pdf.

[6] CORONA PEREZ, O. M. A. R.; TERATOL PEREZ, J. U. A. N. ROBOT AÉREO NO TRIPULADO AUTÓNOMO TIPO QUADROTOR (CUADRICOPTERO). 2014. Disponible: <http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/2672>.

[7] GIRALDO PANIAGUA, Kevin Estiven; JIMÉNEZ SALAZAR, Santiago. Sistema de navegación autónomo guiado mediante generación de trayectorias para un robot móvil en entorno controlado. 2020. Disponible: <http://repository.eia.edu.co/handle/11190/2538>

[8] IBÁÑEZ RUBIO, María. Control de vuelo para seguimiento de trayectorias de un cuadricóptero simulado mediante ROS/Gazebo. 2020. Disponible: <https://zaguan.unizar.es/record/101422/files/TAZ-TFG-2020-4841.pdf?version=1>

[9] SAMANIEGO RIERA, Franklin Eduardo. Diseño de nuevos algoritmos de guiado y navegación con evasión de colisiones para vehículos aéreos no tripulados. 2021. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València, doi: 10.4995/Thesis/10251/161274.

[10] MUELA GUAICHA, Stalin Rene; RIVERA GUERRERO, Karen Vanessa. Teleoperación con realimentación de fuerza para una formación de robots manipuladores aéreos basados en algoritmos de control distribuido. 2020. Tesis de Licenciatura. Quito, 2020. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21068>.

[11] LASECA PÉREZ, David. Simulación, implementación y control de un robot hexápodo. 2021. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València. Disponible: <https://riunet.upv.es/handle/10251/170856>.

[12] ANTAMBA RIVERA, Jefferson Vladimir; QUIÑÓNEZ IBUJÉS, Johana Belén. Diseño y simulación de controladores tipo PID y espacios nulos para seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos aplicados a una formación de manipuladores aéreos. 2020. Tesis de Licenciatura. Quito, 2020. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20702>.

[13] CHÉRREZ BARRAGÁN, Diana Estefanía. Diseño y simulación de algoritmos de control basados en modo deslizante, espacio nulo y tipo PID, para seguimiento de trayectoria y evasión de obstáculos de una formación de robots móviles. 2018. Tesis de Licenciatura. Quito, 2018. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19209>.

[14] OROZCO-SOTO, Santos Miguel; FERNÁNDEZ, Julio César Ramos. Control par calculado difuso basado en pasividad para seguimiento de trayectorias de robots manipuladores. *Res. Comput. Sci.*, 2015, vol. 91, p. 131-141. Disponible: https://www.rcs.cic.ipn.mx/2015_91/Control%20par%20calculado%20dif%20uso%20basado%20en%20pasividad%20para%20seguimiento%20de%20rayectorias%20de%20robots.pdf

[15] GORDILLO, Francisco. Estabilidad de sistemas no lineales basada en la teoría de Liapunov. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 2009, vol. 6, no 2, p. 5-16, doi: [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70088-3](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70088-3)

[16] GRIJALVA, David F., et al. Non-linear Control of Aerial Manipulator Robots Based on Numerical Methods. En *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*. Springer, Cham, 2020. p. 97-107, doi:10.1007/978-3-030-55789-8_9

[17] ROSALES, Claudio, et al. Seguimiento de trayectoria de un mini-helicóptero de cuatro rotores basado en métodos numéricos. XIV Reunión de Trabajo Procesamiento de la Información y Control, 2011, p. 495-500. Disponible: http://inaut6.inaut.unsj.edu.ar/publicaciones/1983_11.pdf