



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación**

**CONTROL AUTÓNOMO BASADO EN LA TÉCNICA DE  
MODO DESLIZANTE PARA TAREAS DE NAVEGACIÓN  
DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

**Autor:**

Vallejo Morales Roberto Carlos

Ing. Jessica S. Ortiz, Mg, *Directora*



# Sliding Mode Control for UAV Trajectory Tracking: Focus on Virtual Learning Environments

Roberto Vallejo and Jessica S. Ortiz

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí-Ecuador.  
{rcvallejo1, jsortiz4}@espe.edu.ec.

**Abstract.** The present work presents a cascade control scheme, in the initial stage, there is a kinematic controller based on the sliding mode technique for the trajectory tracking of a UAV. Secondly, a dynamic controller is cascaded, this controller allows to compensate the perturbation and velocity errors of the robot. For this purpose, the simplified dynamic model of the UAV is used. For testing purposes, a virtual reality simulator is presented to test the proposed control scheme at laboratory level. The virtual reality environment will allow evaluating the UAV performance as much as possible. The virtual reality environment has the digitized physical robot, with its dynamic model and all the movement characteristics. The controller is simulated and then experimental tests are performed with the physical UAV in a partially structured environment and with wind disturbances at the time of the experiment, an  $RMSE = 0.32$  [m] is obtained for the UAV position.

**Keywords:** sliding mode, trajectory tracking, virtual reality, dynamic model.

## 1 Introduction

In the last decades, robotics has grown significantly, presenting a wide variety of service robots that can perform various tasks in multiple environments: industrial [1], healthcare [2], public services [3], military [4], among other fields. These service robots can be autonomous or controlled by humans and can come in various shapes and forms, from robots with legs to robots with wheels or propellers. Robots today are used to solve dangerous tasks, thus preventing the risk of occupational accidents and increasing productivity. One of these types of robots are called unmanned aerial vehicle (UAV) or more frequently referred to as drones [5]. UAVs or drones are robots that have the ability to move from one place to another by their propellers. They are used in various applications, such as: for transporting objects over long distances, inspection of structures [6], agriculture [7], aerial photography [8], search operations [9], among other applications.

For a UAV to operate autonomously and effectively, it is essential to have a control system that allows complex tasks to be performed autonomously and safely within the working environment. Most autonomous controls use the mathematical model of the robot. Having a mathematical model of these robots is crucial to ensure the safety and

### Lecture Notes in Networks and Systems

Q4

Computer Networks and Communications  
best quartile

SJR 2022  
0.15

powered by scimagojr.com

FTC 2023

Future Technologies Conference 2023  
2-3 November 2023 | San Francisco, United States

16 June 2023

### Acceptance Letter - Future Technologies Conference 2023

Dear Roberto Vallejo Jessica S. Ortiz,

Congratulations! Your paper "Sliding Mode Control for UAV Trajectory Tracking: Focus on Virtual Learning Environments" has been accepted for oral presentation in the Future Technologies Conference 2023 to be held from 2-3 November 2023 in San Francisco, United States.

The Future Technologies Conference presents the best of current systems research and practice, emphasizing innovation and quantified experience. FTC has emerged as a renowned world-wide gathering of academic researchers, Ph.D. and graduate students, top research think tanks and industry technology developers.

Each of the manuscripts for this conference was reviewed based on the criteria of originality, significance, quality and clarity. We have followed double blind peer review process and each paper was reviewed by at least three regular PC members or two senior PC members.

Future Technologies Conference proceedings will be published in Springer series "Lecture Notes in Networks and Systems" (ISSN: 2367-3370) and submitted for consideration to Scopus, Web of Science, DBLP, INSPEC, WTI Frankfurt eG, zbMATH, SCImago.

You may now proceed with the registration process for publication and presentation of your paper at Future Technologies Conference 2023.

Online Registration: <https://saiconference.com/FTC>

Regards,  
Supriya Kapoor  
Conference Manager  
Future Technologies Conference 2023  
<https://saiconference.com/FTC>

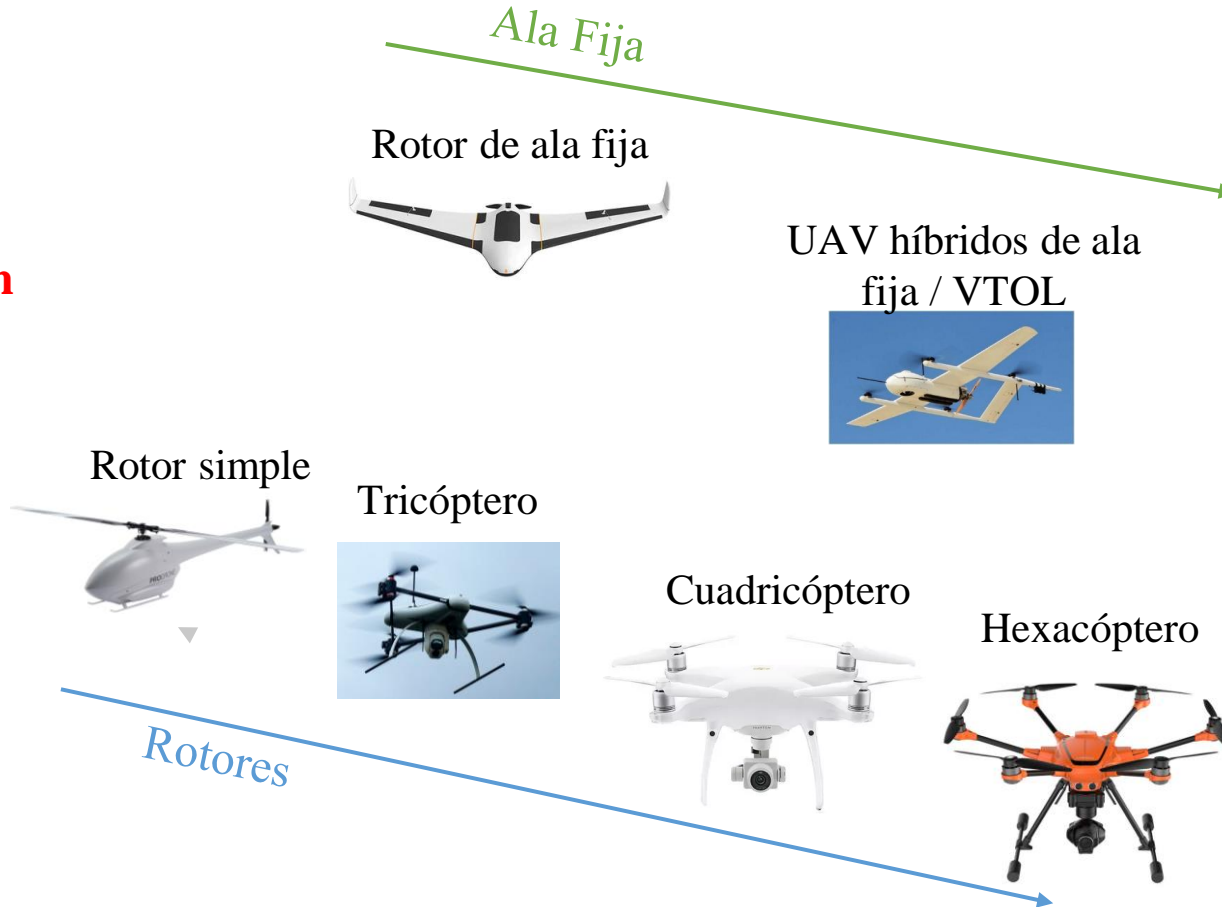


- 1 Introducción
- 2 Modelo del Vehículo Aéreo no Tripulado
- 3 Planteamiento del Controlador
- 4 Resultados Experimentales
- 5 Conclusiones

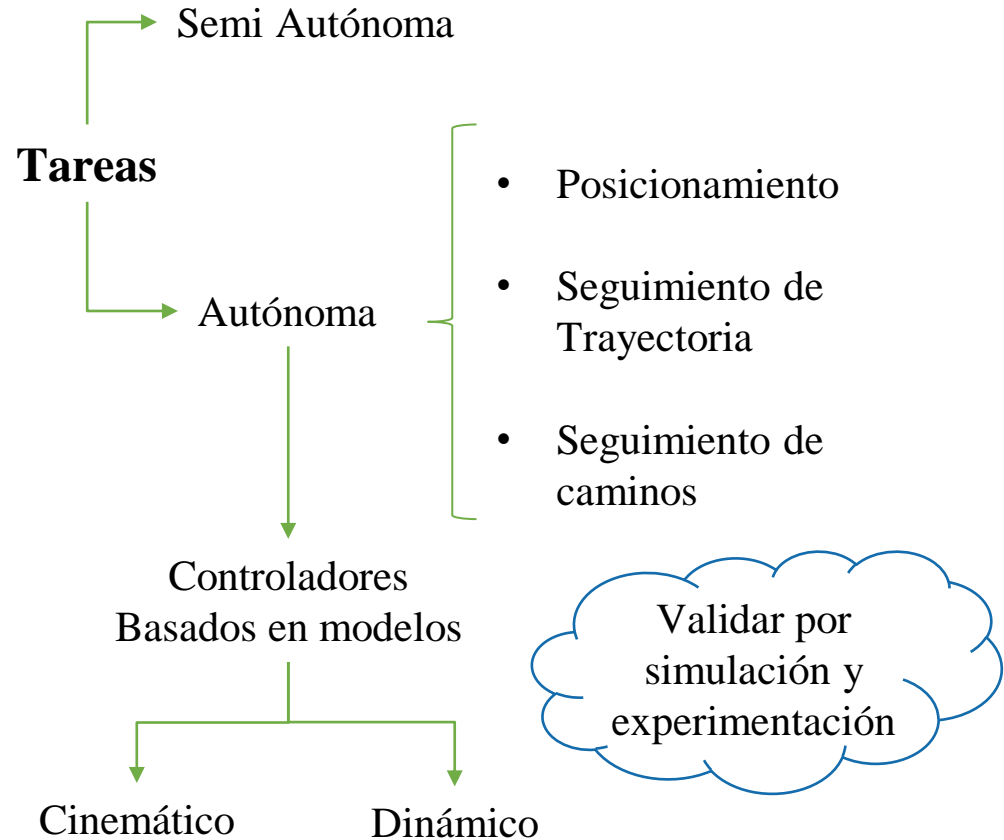
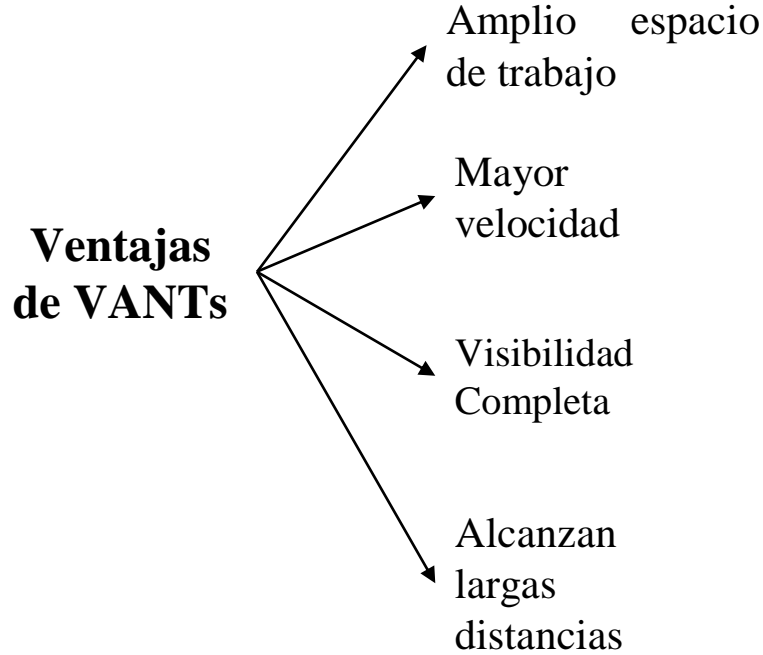
- 1 **Introducción**
- 2 Modelo del Vehículo Aéreo no Tripulado
- 3 Planteamiento del Controlador
- 4 Resultados Experimentales
- 5 Conclusiones

## Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs)

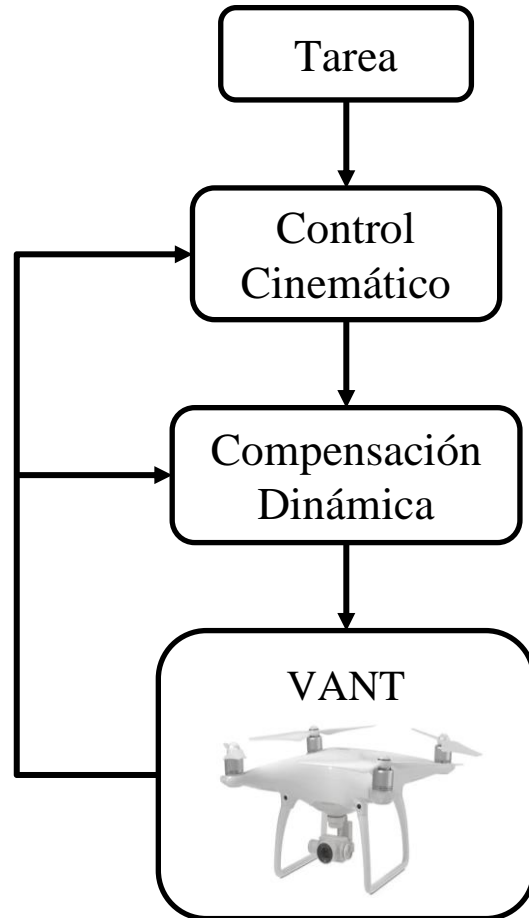
### Clasificación







## *Propuesta*





## *Objetivo General*

Implementar un **algoritmo de control basado en la técnica de modo deslizante** para ejecutar **tareas autónomas** de un vehículo aéreo no tripulado de seis hélices rotativas..

## *Objetivos Específicos*

- Investigar en las diversas **bases de datos científicas** acerca de la **modelación**, y **técnicas de control teleoperado** para un vehículo aéreo no tripulado.
- Determinar las **características y restricciones** del movimiento de un vehículo aéreo no tripulado.
- Proponer un **algoritmo de control** basado en la técnica de modo deslizante, a fin de ejecutar **tareas de navegación autónoma**.

## *Objetivos Específicos*

- Analizar matemáticamente la **estabilidad del algoritmo** de control propuesto, a fin de **evaluar la evolución de los errores** de control.
- Simular y ajustar **los parámetros del algoritmo** de control propuesto con el objetivo de **analizar el desempeño** del robot.
- Desarrollar **pruebas experimentales** sobre un vehículo aéreo no tripulado, a fin de **evaluar el algoritmo** de control propuesto.

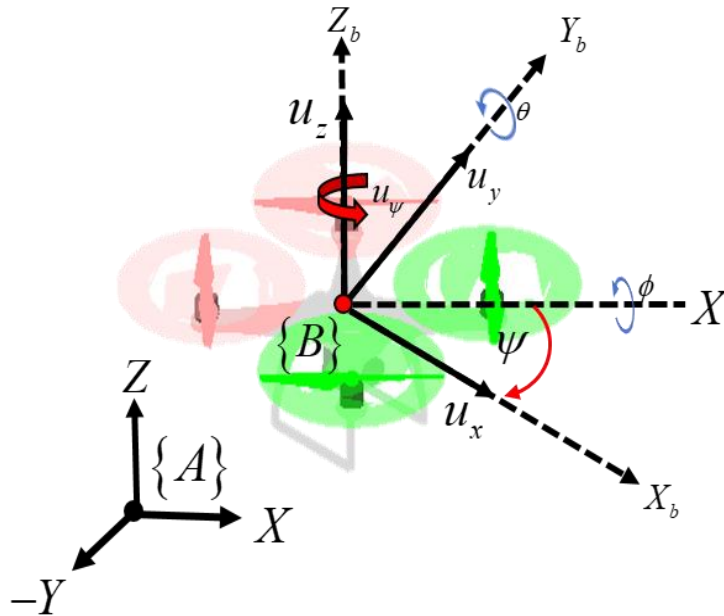
- 1 Introducción
- 2 Modelo del Vehículo Aéreo no Tripulado**
- 3 Planteamiento del Controlador
- 4 Resultados Experimentales
- 5 Conclusiones

## A) *Modelo Cinemático*

La cinemática del VANTs nos describir la relación entre las entradas de control.



## A) Modelo Cinemático



### Velocidades de Maniobra

$$\text{Posición: } \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_b(t) \\ y_b(t) \\ z_b(t) \end{bmatrix}$$

$$\text{Orientación: } \boldsymbol{\eta}(t) = \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \theta(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix}$$

Roll  $\phi(t)$     Pitch  $(\theta)$     Yaw  $\psi(t)$

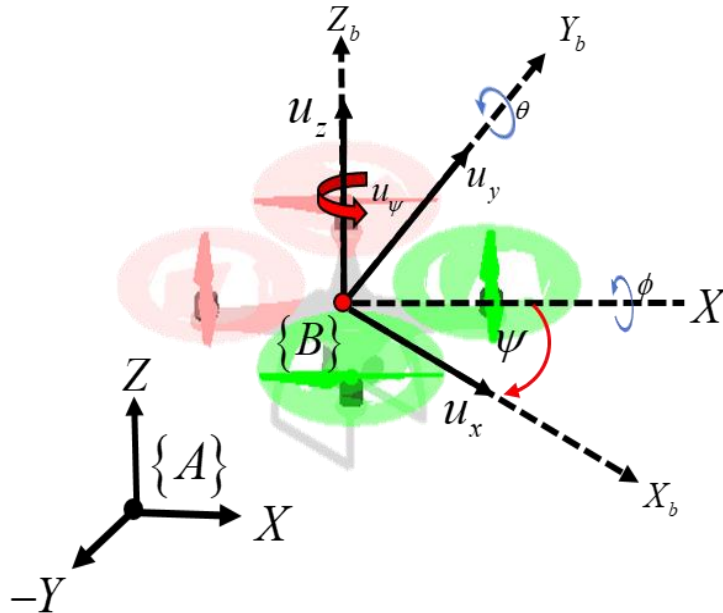
$u_x$  Velocidad lineal frontal

$u_y$  Velocidad lineal lateral

$u_z$  Velocidad lineal elevación

$u_\psi$  Velocidad angular

## A) Modelo Cinemático



### Velocidad Lineal:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b(t) \\ y_b(t) \\ \dot{z}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x(t) \\ u_y(t) \\ u_z(t) \end{bmatrix}$$

### Velocidad Angular:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\psi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_\psi(t) \end{bmatrix}$$

Se considera que el robot trabaja a velocidades pequeñas, entonces. Entonces, la matriz que relaciona los marcos de referencia  $\{B\}$  y  $\{A\}$  solo depende de la orientación Yaw ( $\psi$ ).

## A) Modelo Cinemático

El modelo cinemático se puede escribir como:

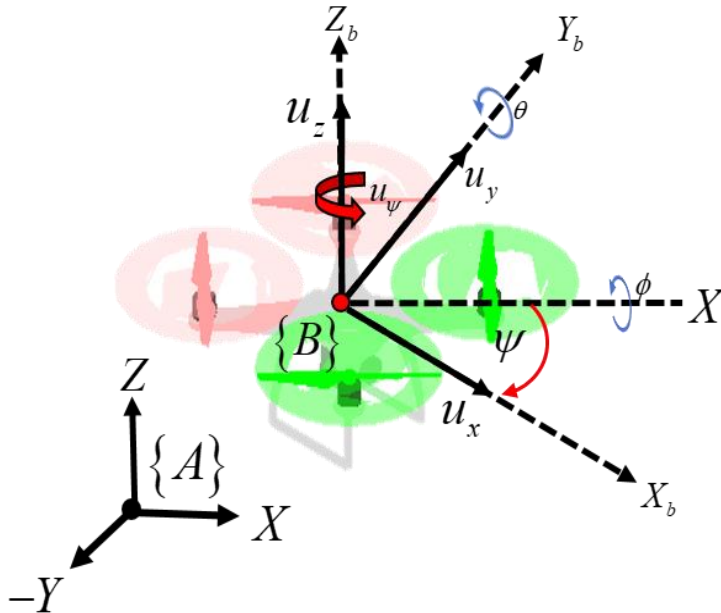
$$\dot{\zeta}(t) = \Gamma(\psi)\mathbf{u}(t)$$

Donde:  $\dot{\zeta}(t) = [\dot{\mathbf{x}}^T \ \dot{\psi}]^T \in \mathbb{R}^4$

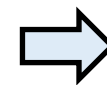
Vector de velocidades en el sistema de referencia  $\{A\}$  (espacio de trabajo)

$$\mathbf{u}(t) = [u_x \ u_y \ u_z \ u_\psi]^T$$

Es el vector de velocidades de maniobrabilidad en  $\{B\}$



$\Gamma(\psi) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  Matriz que relaciona las velocidades del marco  $\{B\}$  con las velocidades en el marco  $\{A\}$  **Matriz Jacobiana**



$$\Gamma(\psi) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(z, \psi) & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$



## B) Modelo Dinámico Simplificado

$$\mathbf{u}_{ref}(t) = \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{F}\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{u}_{ref} = [u_{xref} \quad u_{yref} \quad u_{zref} \quad u_{\psi ref}]^T$$

$$\mathbf{D}, \mathbf{F} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$$

Vector de Velocidades de Referencia

Matrices Diagonales del Robot

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = [\dot{u}_x \quad \dot{u}_y \quad \dot{u}_z \quad \dot{u}_\psi]^T$$

Vector de Aceleraciones

$$\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^4$$

Vector de Velocidades

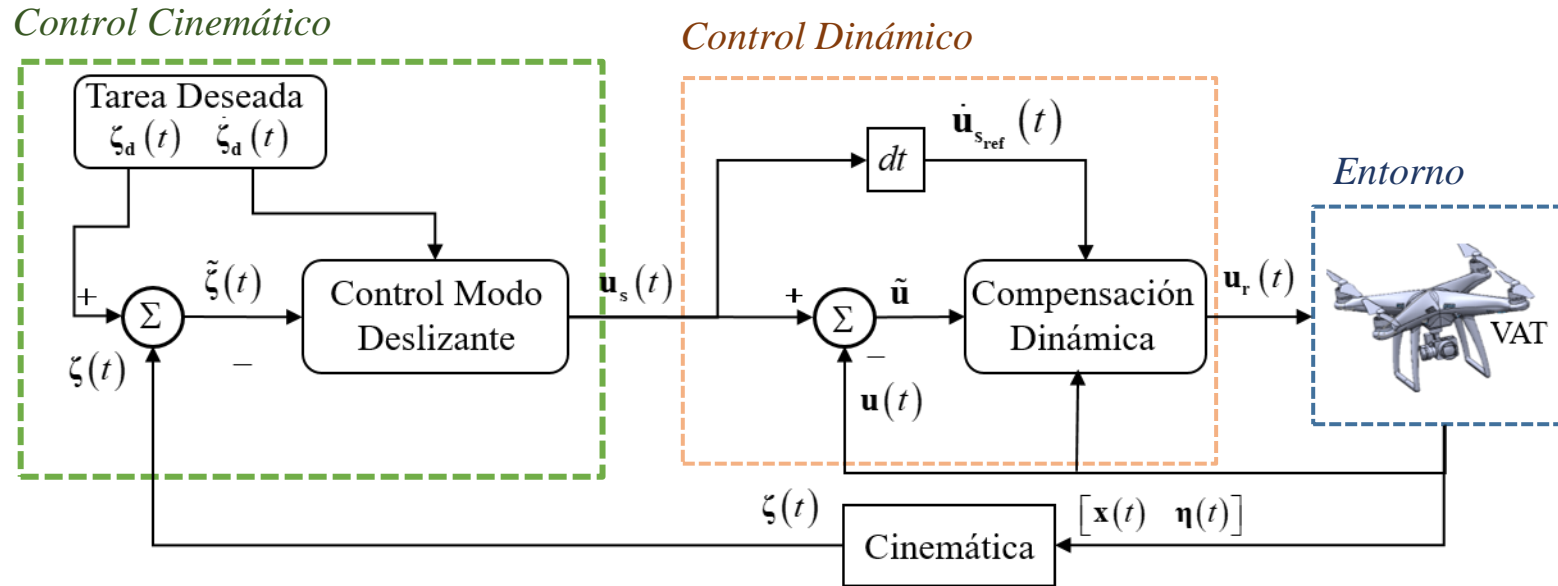
Phantom 4pro

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0,6599 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6725 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4642 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2756 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0,5978 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6628 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,145 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9398 \end{bmatrix}$$

- 1 Introducción
- 2 Modelo del Vehículo Aéreo no Tripulado
- 3 Planteamiento del Controlador**
- 4 Resultados Experimentales
- 5 Conclusiones

## Esquema de Control (Control en Cascada)



## A) *Control Cinemático (Control Modo Deslizante)*

$$\mathbf{u}_s(t) = \mathbf{v}_C(t) + \mathbf{v}_D(t)$$

1.  $\mathbf{v}_C(t) \in \mathbb{R}^4$  **Acción de Control Continua:** Esta acción de control permite que el Sistema permanezca en la superficie deslizante.

Superficie deslizante propuesta:

$$s = \tilde{\zeta}(t) + \mathbf{K}_s \int \tilde{\zeta}(t) dt$$

Donde:

$\tilde{\zeta}(t) = \zeta_d(t) - \zeta(t)$  Errores de seguimiento de trayectoria

$\mathbf{K}_s \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$  es una matriz de ganancia

$\lambda$  es una constante de diseño

## A) Control Cinemático (Control Modo Deslizante)

$$s = \tilde{\zeta}(t) + \mathbf{K}_s \int \tilde{\zeta}(t) dt$$

Derivando  $s$  y  $\tilde{\zeta}(t)$ :

$$\dot{s} = \dot{\tilde{\zeta}}(t) + \mathbf{K}_s \tilde{\zeta}(t) \quad \dot{\tilde{\zeta}}(t) = \dot{\zeta}_d(t) - \dot{\zeta}(t)$$

Considerando que la parte continua  $\mathbf{v}_c(t)$  está sobre la superficie deslizante, y sustituyendo el error:

$$\dot{s} = 0 = \dot{\zeta}_d(t) - \dot{\zeta}(t) + \mathbf{K}_s \tilde{\zeta}(t)$$

Como  $\dot{\zeta}(t) = \mathbf{\Gamma}(\psi)\mathbf{u}(t)$  y el robot está sobre  $s$  resulta  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{v}_c(t)$

Acción de control continua

$$\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{\Gamma}(\psi)^{-1} \left( \dot{\zeta}_d(t) + \mathbf{K}_s \tilde{\zeta}(t) \right)$$

## A) *Control Cinemático (Control Modo Deslizante)*

$$\mathbf{u}_s(t) = \mathbf{v}_C(t) + \mathbf{v}_D(t)$$

2.  $\mathbf{v}_D(t) \in \mathbb{R}^4$  **Acción de Control Discontinua:** Esta acción de control permite al Sistema buscar la superficie de deslizamiento.

Se propone na candidata de Lyapunov:

$$V = \mathbf{s}\mathbf{s}^T \xrightarrow{\text{Derivando}} \dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}}$$

Sustituyendo  $\dot{\mathbf{s}}$ :

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \left( \dot{\boldsymbol{\zeta}}_d(t) - \boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{u}(t) + \mathbf{K}_s\tilde{\boldsymbol{\zeta}}(t) \right)$$

Como  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_s(t)$  y simplificando:

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \left( -\boldsymbol{\Gamma}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v}_D(t) \right)$$

## A) Control Cinemático (*Control Modo Deslizante*)

Para que el sistema sea estable  $\dot{V} < 0$ , entonces se propone:

Acción de control discontinua

$$v_D(t) = \Gamma(\psi)^{-1} K_D f(s)$$

Donde:

$K_D \in \mathbb{R}^4$  Matriz diagonal de ganancia .

$f(s) = \frac{s}{|s| + \sigma}$  Función que permite mantener la estabilidad del controlador:

$\sigma$  Constante Positiva

## *B) Estabilidad del Control Cinemático*

Sustituyendo  $v_D(t)$  en  $\dot{V}$  resulta:

$$\dot{V} = s^T(-\mathbf{K}_D f(s))$$

Si  $\mathbf{K}_D \in \mathbb{R}^4$  es definida positiva, resulta que  $\dot{V} < 0$ , esto significa que:

$$s(t) \rightarrow 0$$

Por lo tanto, el sistema alcanza la superficie deslizante y que los errores de control  $\tilde{\zeta}(t) \rightarrow 0$  tienden a ser ceros.

Con la función  $f(s)$  reducimos las oscilaciones en el momento de llevar  $s(t) = 0$  de forma asintótica.



## C) *Compensador Dinámico*

$$\mathbf{u}_r(t) = \mathbf{D}\mathbf{a}(t) + \mathbf{F}\mathbf{u}(t)$$

$\mathbf{a}(t)$  acción de control propuesta que permite corregir los errores de velocidad  $\tilde{\mathbf{u}}(t)$

Acción de Control:  $\mathbf{a}(t) = \dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K}_r\tilde{\mathbf{u}}(t)$

Donde:

$\tilde{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{u}_s(t) - \mathbf{u}(t)$  Vector de error de velocidades

$\dot{\mathbf{u}}_s(t)$  Vector de las aceleraciones deseadas

$\mathbf{u}(t)$  Vector de velocidades del VANT

$\mathbf{K}_r \in \mathbb{R}^4$  Matriz diagonal positiva de ganancia .

- 1 Introducción
- 2 Modelo del Vehículo Aéreo no Tripulado
- 3 Planteamiento del Controlador
- 4 **Resultados Experimentales**
- 5 Conclusiones

## A) Simulación en un entorno Virtual

Se realiza pruebas de simulación en un **entorno virtual**, donde se ajusta las ganancias de los controladores



## B) Pruebas Experimentales

Se realiza pruebas con el robot en un ambiente parcialmente estructurado.



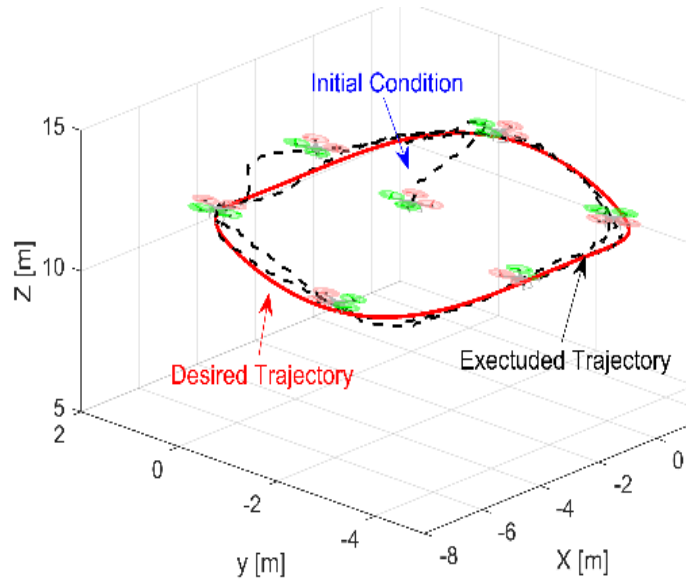
Movimiento del Robot en el entorno real

## B) Pruebas Experimentales

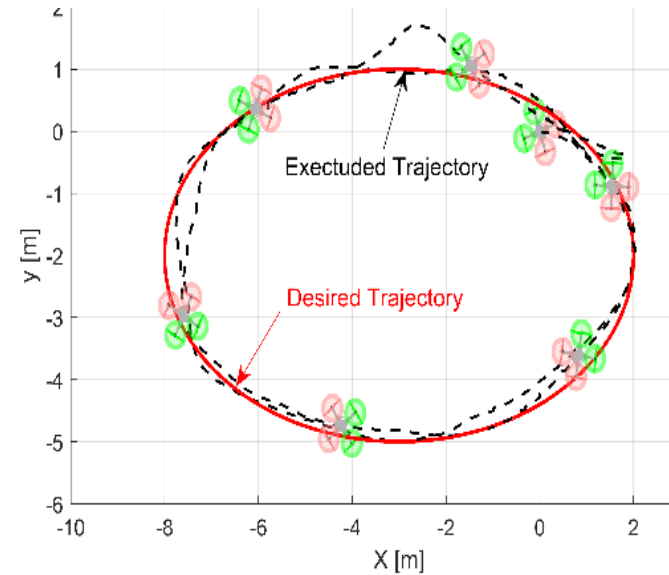
Se realiza pruebas con el robot en un ambiente parcialmente estructurado.



## B) Pruebas Experimentales



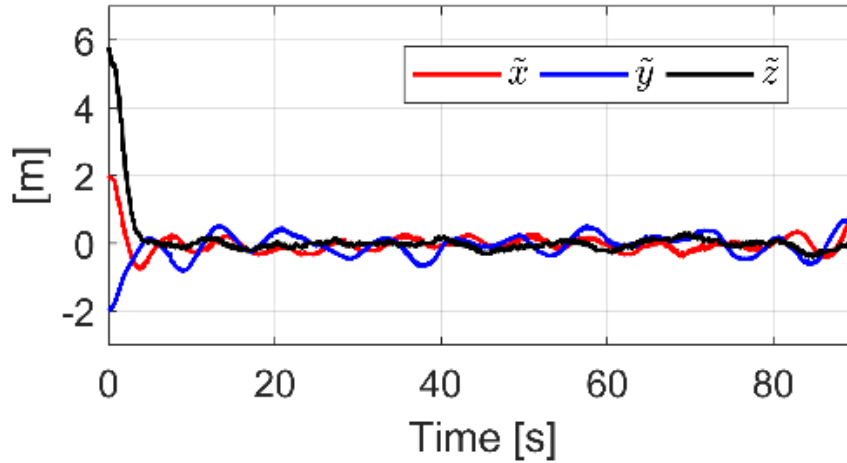
Movimiento realizado por el robot  
en el espacio XYZ



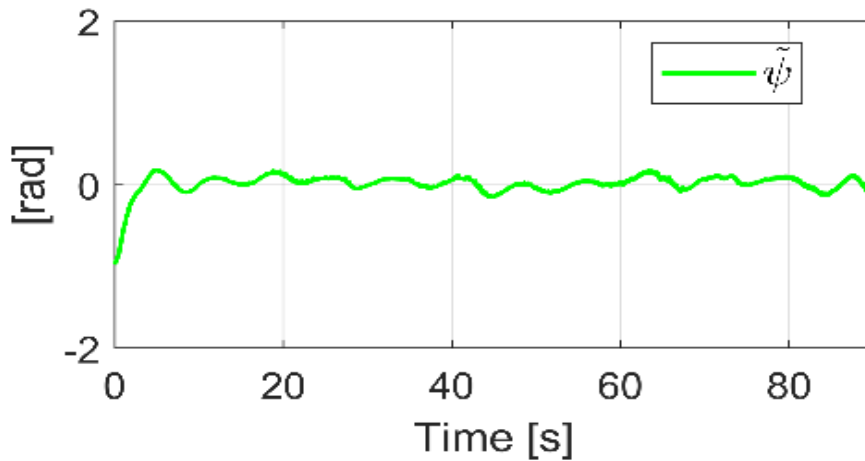
Movimiento realizado por el robot  
en el plano XY

## B) Pruebas Experimentales

Control Cinemático  
(Control Modo Deslizante)

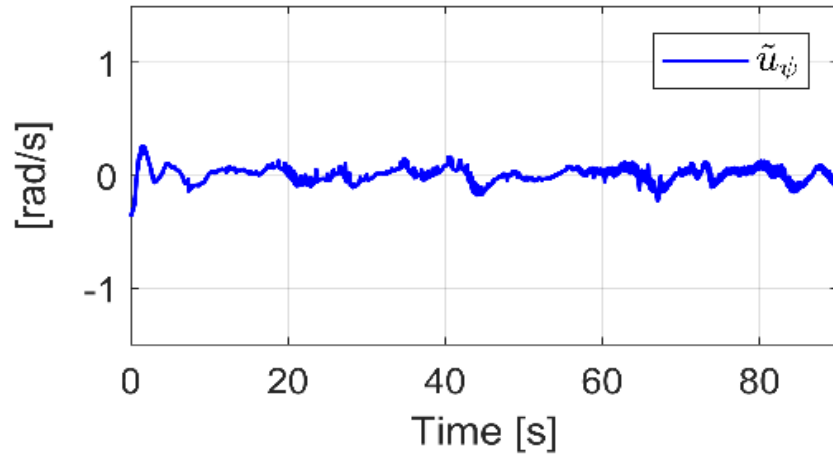
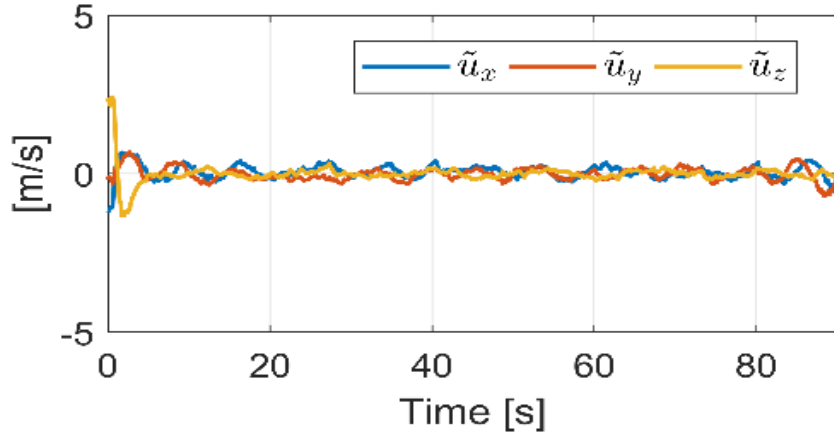


Errores de Posición



Error de Orientación

## B) Pruebas Experimentales



Control Dinámico

Errores de Velocidades Lineales

Error de Velocidad de Orientación



- 1 Introducción
- 2 Modelo del Vehículo Aéreo no Tripulado
- 3 Planteamiento del Controlador
- 4 Resultados Experimentales
- 5 Conclusiones

- El modelo cinemático obtenido del robot ha permitido establecer el controlador en modo deslizante para el seguimiento de trayectoria de un Vehículo Aéreo no Tripulado.
- Con el modelo dinámico simplificado del VANT se planteó un control en cascada que permitió compensar los errores de velocidades del robot.
- El simulador desarrollado en realidad virtual permitió ajustar las ganancias de los controladores y a su vez, observar el comportamiento previo del robot. Con las ganancias ajustadas en simulación se asegura que el robot físico cumpla con la tarea.
- Mediante los resultados experimentales se demuestra el funcionamiento del control en modo deslizante para el seguimiento de trayectoria y con el funcionamiento del compensador dinámico en cascada.



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación**

**CONTROL AUTÓNOMO BASADO EN LA TÉCNICA DE  
MODO DESLIZANTE PARA TAREAS DE NAVEGACIÓN  
DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

**Autor:**

Vallejo Morales Roberto Carlos

Ing. Jessica S. Ortiz, Mg, *Directora*

