



**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 DESACOPLADO DE UN ROBOT MANIPULADOR AÉREO PARA TAREAS  
DE NAVEGACIÓN Y MANIPULACIÓN AUTÓNOMAS**

**Autor:**

Guanopatin Claudio, Alex Vinicio

Mgs. Ortiz Moreano, Jessica Sofía, *Directora*



# FTC 2023 - Future Technologies Conference 2023

2-3 November 2023 | San Francisco, United States

## Meaningful Learning Processes of Service Robots through Virtual Environments.

Alex V. Guanopatin and Jessica S. Ortiz

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

**Abstract.** This paper presents a control scheme for navigation tasks of an aerial manipulator robot. The proposed controller prioritizes the kinematics of the system considering its high redundancy, which is composed of an aerial platform and an anthropomorphic 3DOF robotic arm, the proposed control scheme is decoupled, i.e., a task is defined for the aerial robot and another task for the robotic arm. To validate the proposed controller, different tests will be performed in a virtual environment and in a partially structured environment. To perform the simulation tests, a virtual environment is developed to visualize the behavior of the manipulator robot, in the simulation environment tasks are planned in the workspace and adjust the controllers, avoiding damage to the physical robot. Once the controllers have been adjusted and simulated, experimental tests are carried out with the aerial manipulator robot.

**Keywords:** UAV, Robotic arm, Aerial manipulator robot.

### 1 Introduction

The use of technology to carry out activities that favor the development and growth of humanity has been one of the main focuses of several research works. Therefore, the design and construction of robots capable of performing tasks considered as human beings, has evolved, developing robots that perform tasks in hazardous environments in order to prevent incidents or accidents to people, robots are intended to facilitate people's lives. [1]. That is why the applications of robots have taken great relevance in the life of modern man, and of course in scientific development. Currently, the services offered by different robots depend on their mechanical structure, presenting a wide variety of robotic systems. [2] [3] Within service robotics, there is one subdivision: *i)*

### Acceptance Letter - Future Technologies Conference 2023



Dear Alex V. Guanopatin, Jessica S. Ortiz,

Congratulations! Your paper "Meaningful Learning Processes of Service Robots through Virtual 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.

Licence to Publish  
Proceedings Papers

SPRINGER NATURE

Lecture Notes in Networks  
and Systems

Q4

Computer  
Networks and  
Communications  
best quartile

SJR 2022

0.15

powered by scimagojr.com





## Industrial



Operan en diferentes sectores y escenarios

## Servicios



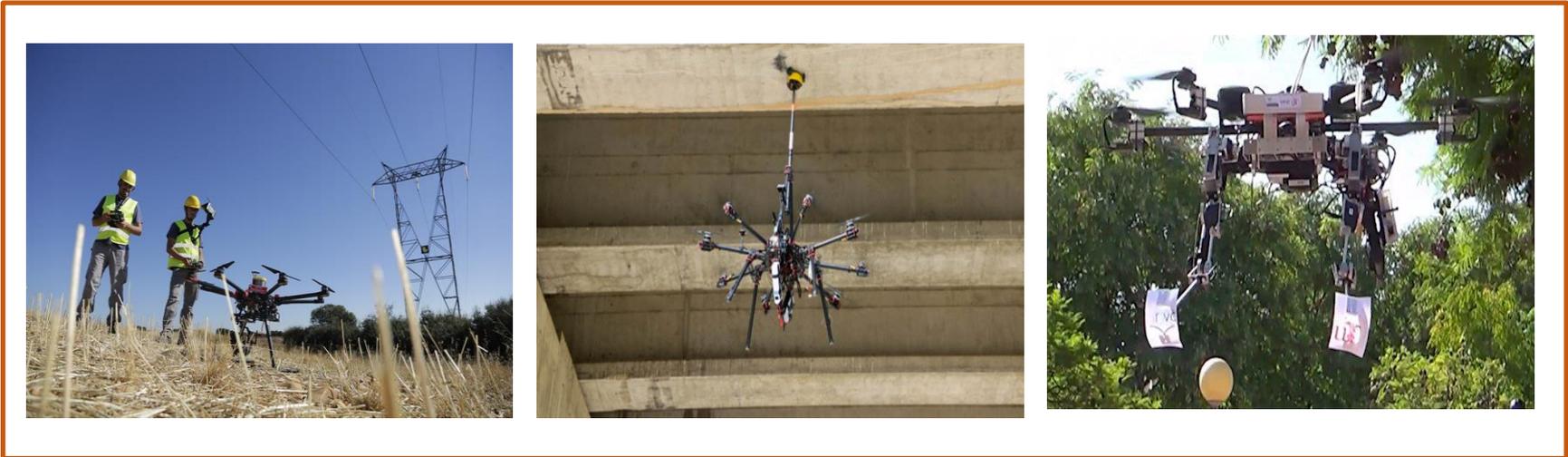
## Vehículo Aéreo no Tripulado



## Brazo Robótico

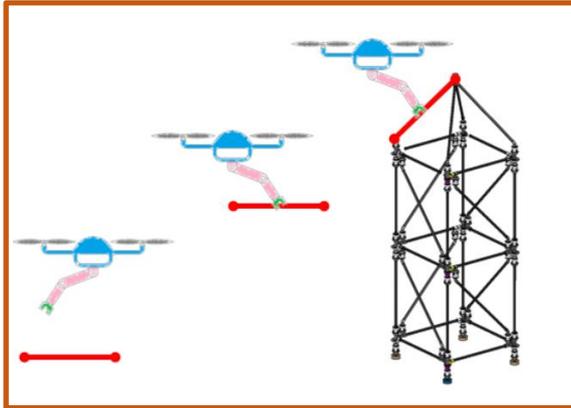


## Aplicaciones



En el ámbito de la robótica aérea se busca plantear varias técnicas de control autónomo, lo que representa:

Alto costo económico



Tareas en entornos peligrosos

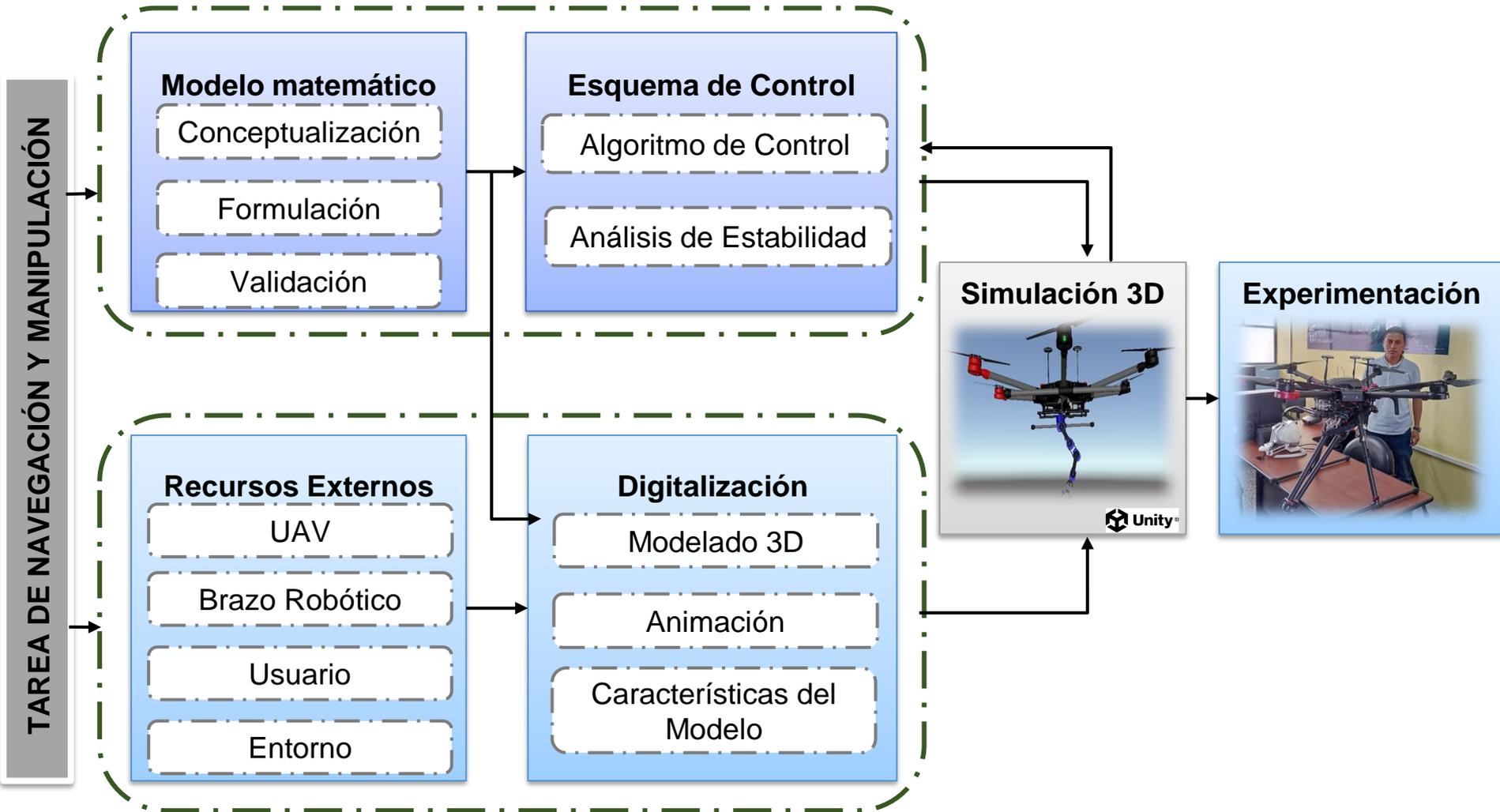
Desempeño óptimo de forma autónoma



**Implementar un esquema de control desacoplado para un robot manipulador aéreo, conformado por un brazo robótico de 3DOF y un vehículo aéreo no tripulado de seis hélices rotativas, a fin de ejecutar tareas de navegación y manipulación.**

- **Investigar** en las diversas bases de datos científicas acerca de la **modelación**, y **control avanzado** para la **ejecución de tareas autónomas de navegación y manipulación** de robots manipuladores aéreos.
- **Determinar** el **modelo matemático** que **represente las características y restricciones del movimiento** del vehículo aéreo no tripulado de seis hélices rotativas.
- **Determinar** el **modelo matemático** que **represente las características y restricciones del movimiento** de un **brazo robótico** de 3DOF de configuración antropomórfica.
- **Proponer** un **esquema de control desacoplado** para un **vehículo aéreo no tripulado** y un **brazo robótico**, a fin de ejecutar tareas autónomas de **navegación y manipulación**.

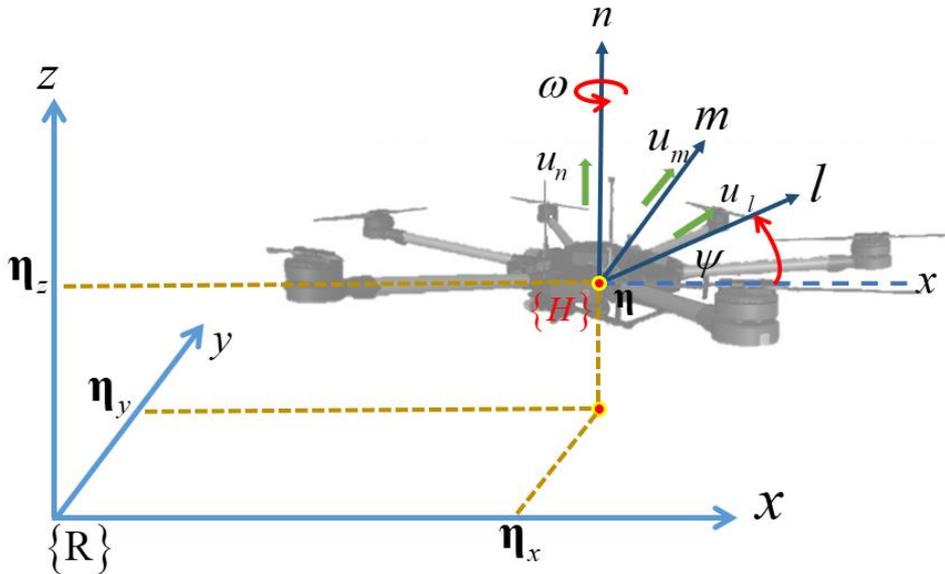
- **Analizar la estabilidad** del esquema de control propuesto, con el **propósito de evaluar** el comportamiento de los **errores de control**.
- **Desarrollar un simulador 3D** que permita evaluar el comportamiento del **robot manipulador aéreo** para la ejecución de tareas autónomas.
- **Desarrollar pruebas experimentales** con un **robot manipulador aéreo**, a fin de **evaluar el desempeño** del esquema de **control propuesto** a través de los **errores de control**.





## CINEMÁTICA DEL UAV

El movimiento del UAV respecto al sistema de referencia fijo  $\{R\}$  se define como:



$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_x \\ \dot{\eta}_y \\ \dot{\eta}_z \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_l \\ u_m \\ u_n \\ \omega \end{bmatrix}$$

$\dot{\eta}(t)$  Vector de velocidades

$J_H$  Matriz movimiento del UAV

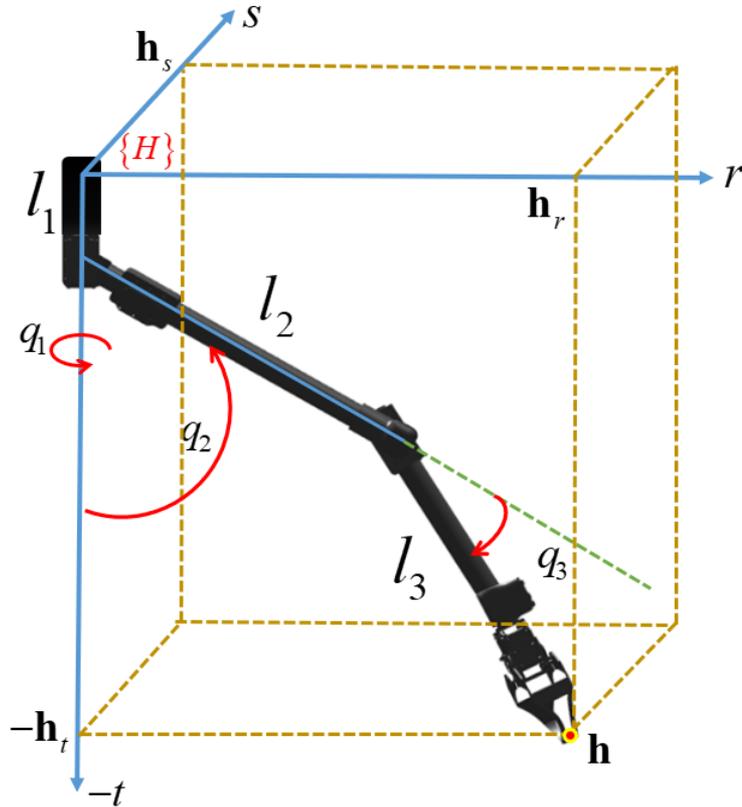
$\mathbf{u}(t)$  Vector de maniobrabilidad

Forma compacta:

$$\dot{\eta}(t) = J_H \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

## CINEMÁTICA DEL BRAZO ROBÓTICO

El movimiento del brazo robótico respecto al sistema de referencia fijo  $\{H\}$  se define como:



$$\begin{bmatrix} \dot{h}_r \\ \dot{h}_s \\ \dot{h}_t \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{A_{3 \times 3}} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$\dot{\mathbf{h}}(t)$  Vector de velocidades

$\mathbf{J}_A$  Matriz movimiento del brazo robótico

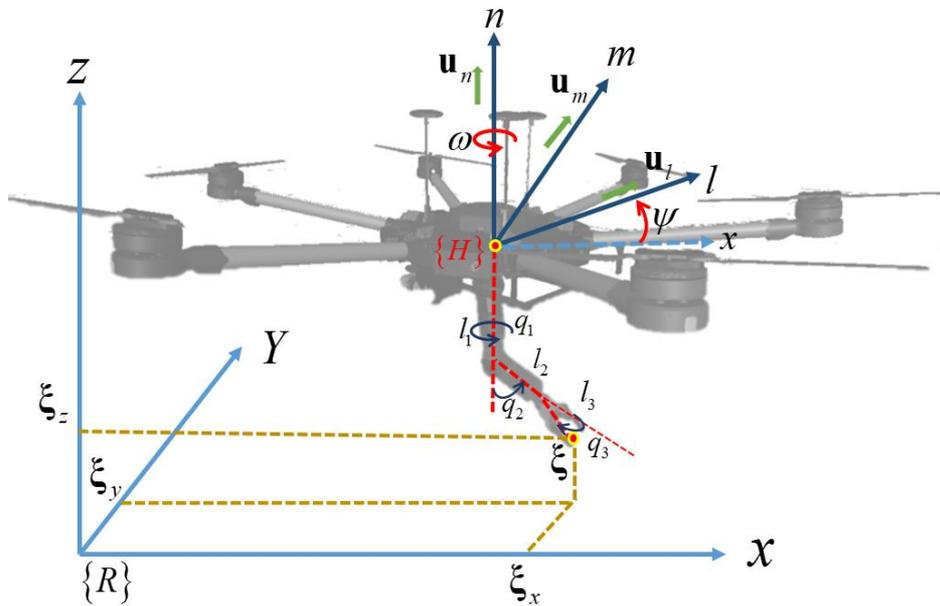
$\dot{\mathbf{q}}_A(t)$  Vector de velocidades articulares

Forma compacta:

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}_A \dot{\mathbf{q}}_A(t) \quad (2)$$

## CINEMÁTICA DEL ROBOT MANIPULADOR AÉREO

Modelación respecto al sistema de referencia  $\{R\}$



$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_z \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{A_{4 \times 7}} \begin{bmatrix} u_l \\ u_m \\ u_n \\ \omega \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$\xi(t)$  Vector de velocidades

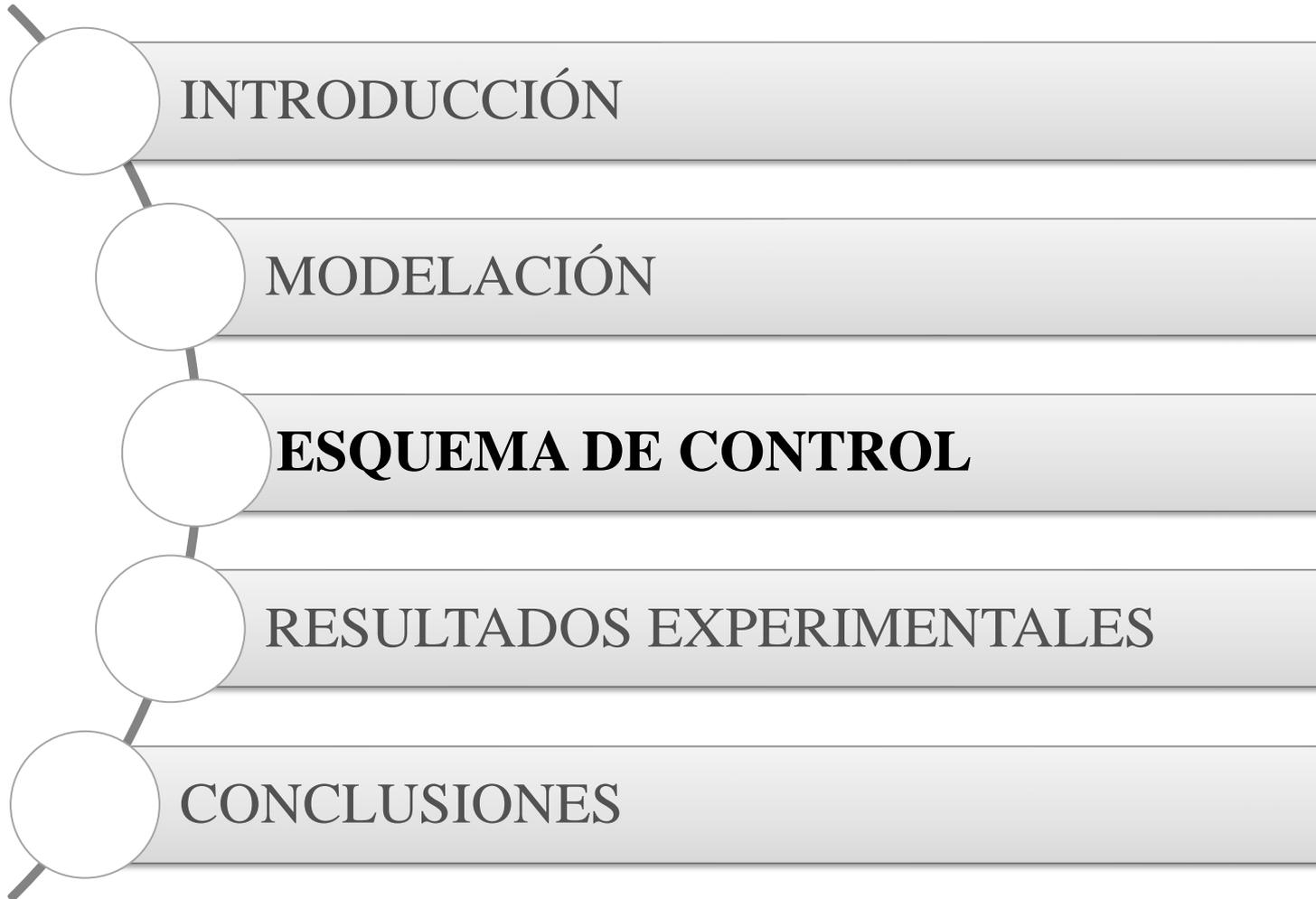
$\mathbf{J}(\mathbf{q})$  Matriz movimiento del sistema robótico

$\chi(t)$  Vector de velocidades de control

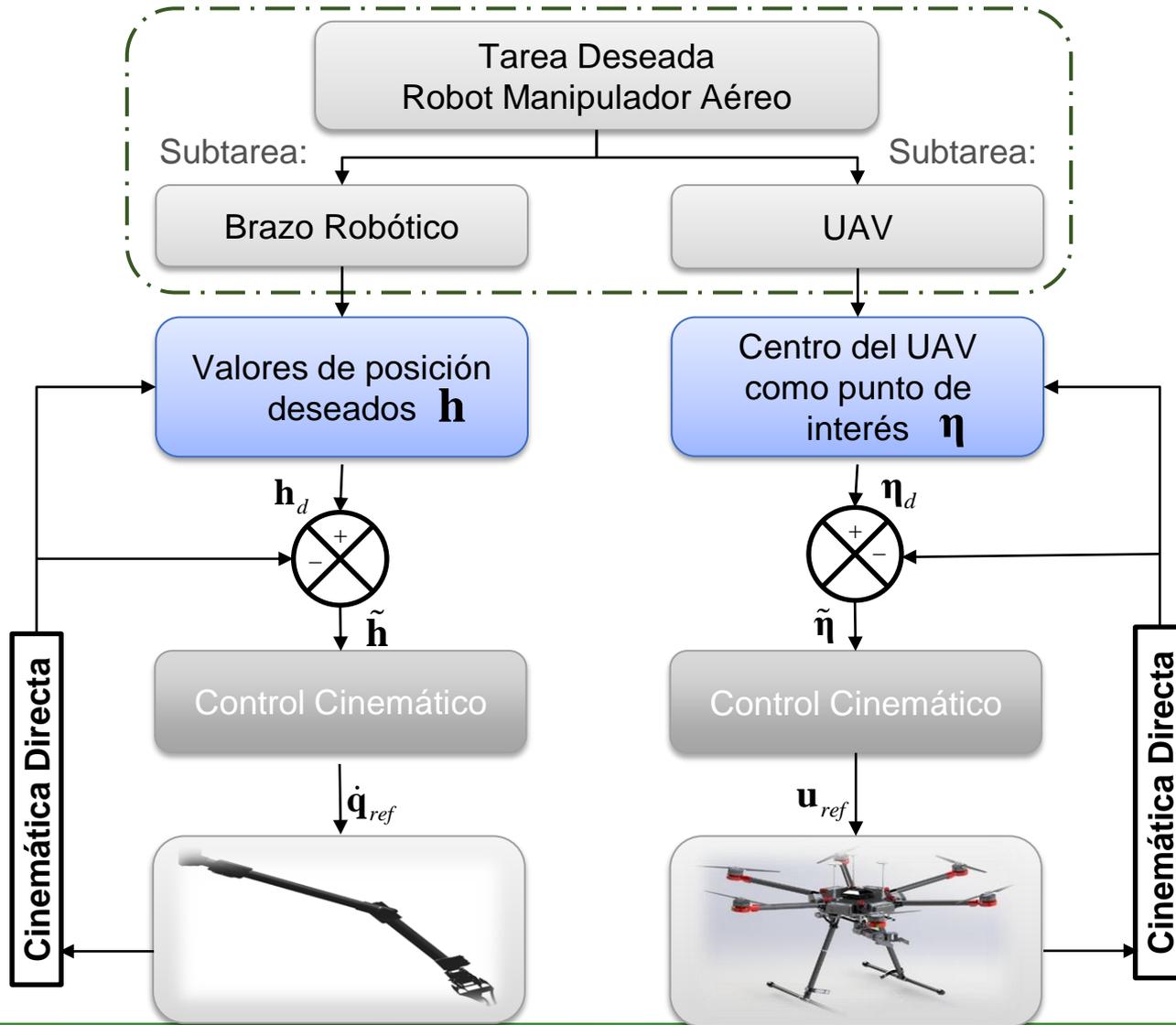
Forma compacta:

$$\xi(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q})\chi(t)$$

(3)



# ESQUEMA DE CONTROL



## *CONTROLADOR - UAV*

El **propósito** del control cinemático es encontrar el vector de **maniobrabilidad** basado en el modelo; se propone la siguiente **ley de control**:

$$\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{J}_H^{-1} \left( \dot{\mathbf{\eta}}_d + \mathbf{K}_H \tanh(\tilde{\mathbf{\eta}}) \right)$$

$\mathbf{J}_H^{-1}$  Matriz inversa jacobiana del UAV

$\dot{\mathbf{\eta}}_d$  Derivada de las posiciones deseadas

$\mathbf{K}_H$  Matriz diagonal de ganancia

$\tilde{\mathbf{\eta}}$  Representa los errores de control

$\alpha \in R^+$

Considerando la candidata de **Lyapunov** de los errores cuadráticos y su derivada

$$V_H(\tilde{\boldsymbol{\eta}}) = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \tilde{\boldsymbol{\eta}} \qquad \dot{V}_H(\tilde{\boldsymbol{\eta}}) = \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}$$

Ahora bien reemplazando  $\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{J}_H \mathbf{u}(t)$  en  $\mathbf{u}_{ref} = \mathbf{J}_H^{-1}(\dot{\boldsymbol{\eta}}_d + \mathbf{K}_H \tanh(\tilde{\boldsymbol{\eta}}))$  y considerando  $\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) = \boldsymbol{\eta}_d - \boldsymbol{\eta}$ , se obtiene:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} = \mathbf{K}_H \tanh(\tilde{\boldsymbol{\eta}}) \quad (4)$$

Luego (4) Se reemplaza en la derivada de la candidata de Lyapunov y se tiene :

$$\dot{V}_H(\tilde{\boldsymbol{\eta}}) = \tilde{\boldsymbol{\eta}}^T \mathbf{K}_H \tanh(\tilde{\boldsymbol{\eta}}) < 0 \quad (5)$$

Por lo tanto:  $\mathbf{K}_H > 0$ , garantizando así que:  $\tilde{\boldsymbol{\eta}} \rightarrow 0$  en  $t \rightarrow \infty$

## *CONTROLADOR - BRAZO ROBÓTICO*

El propósito del control cinemático es encontrar el vector de **maniobrabilidad** basado en el modelo; se propone la siguiente **ley de control**:

$$\dot{\mathbf{q}}_{ref} = \mathbf{J}_A^{-1} \left( \dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}_A \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \right)$$

$\mathbf{J}_A^{-1}$  Matriz inversa jacobiana de brazo robótico

$\dot{\mathbf{h}}_d$  Derivada de las posiciones deseadas

$\mathbf{K}_A$  Matriz diagonal de ganancia

$\tilde{\mathbf{h}}$  Representa los errores de control

$\alpha \in \mathbb{R}^+$

Considerando la candidata de Lyapunov de los errores cuadráticos y su derivada

$$\mathbf{V}_A(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}} \quad \dot{\mathbf{V}}_A(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}}$$

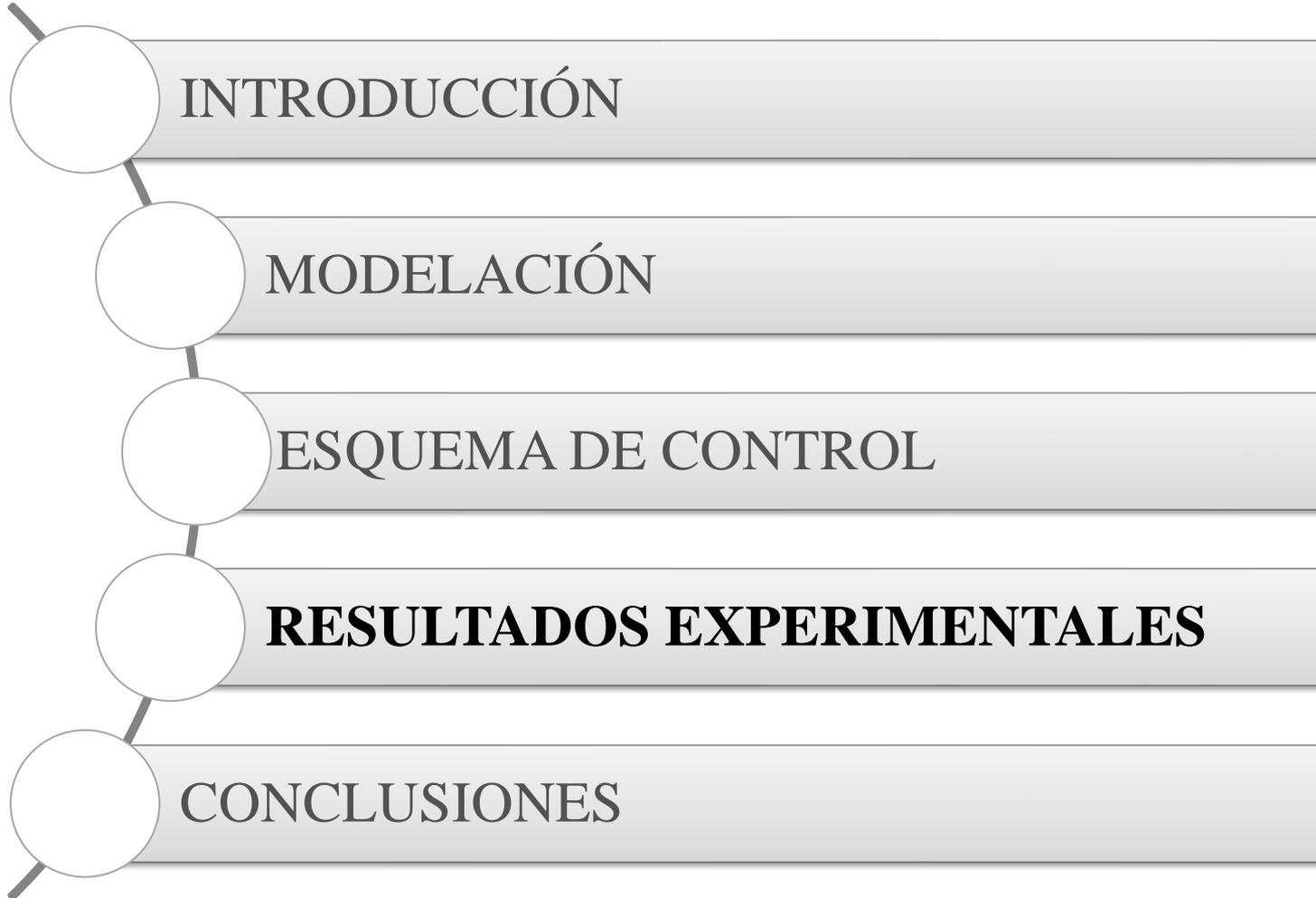
Ahora bien reemplazando  $\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}_A \dot{\mathbf{q}}_A(t)$  en  $\dot{\mathbf{q}}_{ref} = \mathbf{J}_A^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K}_A \tanh(\tilde{\mathbf{h}}))$  y considerando  $\tilde{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{h}_d - \mathbf{h}$ , se obtiene:

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \mathbf{K}_A \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \quad (6)$$

Luego (6) Se reemplaza en la derivada de la candidata de Lyapunov y se tiene :

$$\dot{\mathbf{V}}_A(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{K}_A \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) < 0 \quad (7)$$

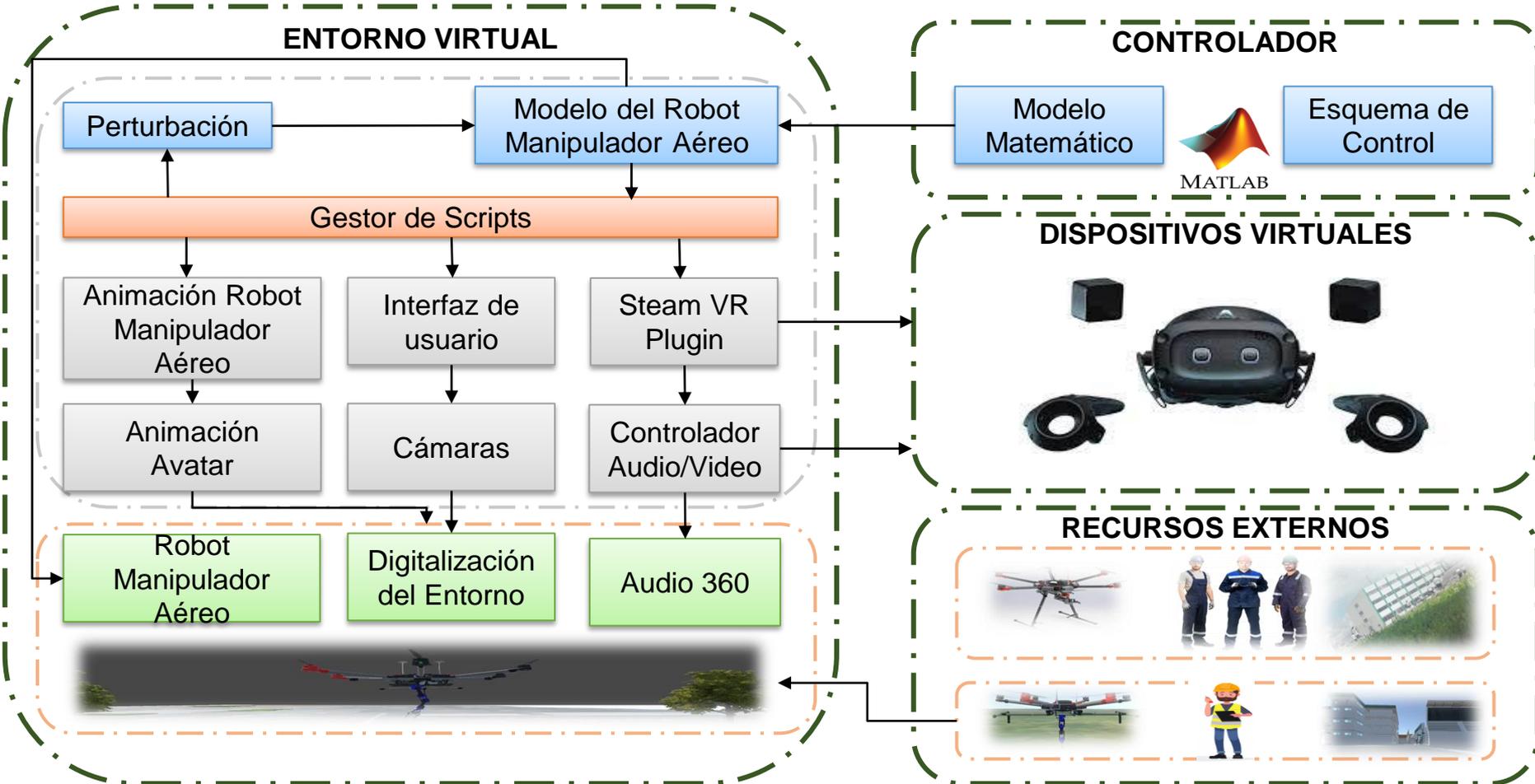
Por lo tanto:  $\mathbf{K}_A > 0$ , garantizando así que:  $\tilde{\mathbf{h}} \rightarrow 0$  en  $t \rightarrow \infty$



## DJI MATRICE 600 PRO



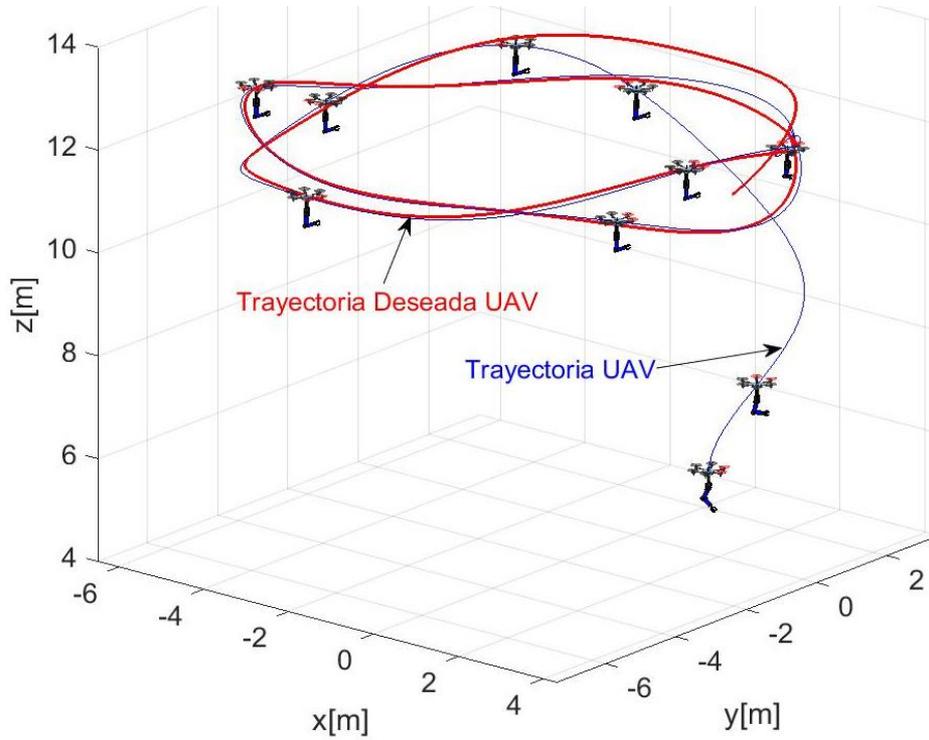
- Peso total de 9.5kg
- Capacidad de carga hasta 5kg
- 6 baterías LiPo 6S 22,8 V y 5700 mAh
- Autonomía de 38 minutos
- Tarjeta de control de vuelo DJI A3 Pro
- 3 sensores D-RTK GNSS
- Velocidad máxima 40mph/65kph
- Acceso a escritura y lectura de datos internos (On Board SDK)
- Comunicación de 5Km



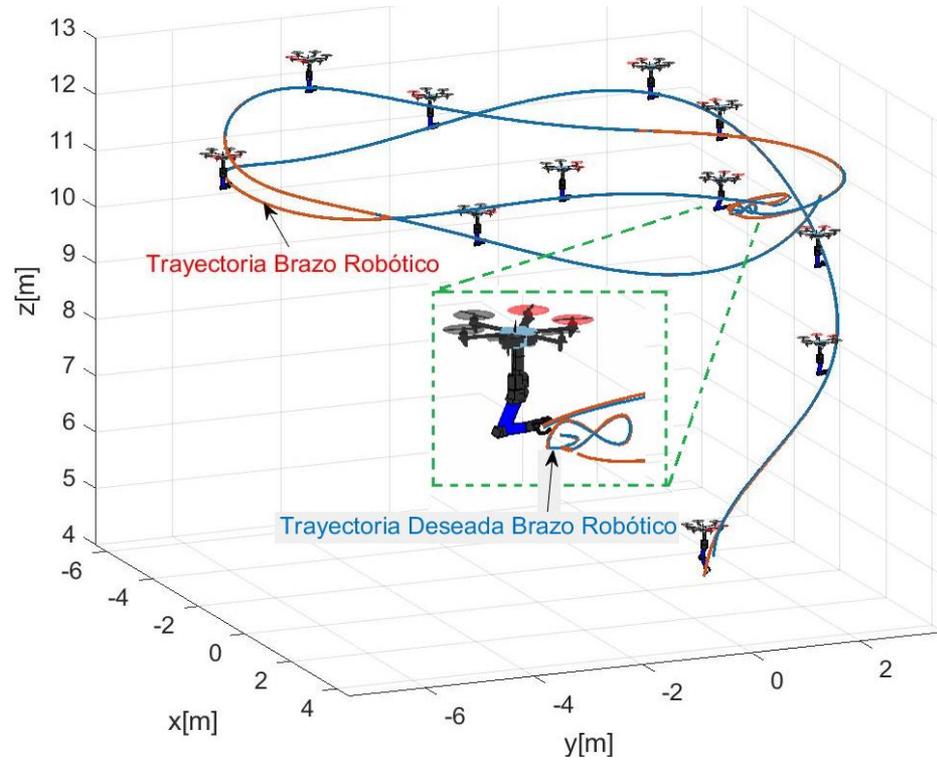


Vídeo Experimental

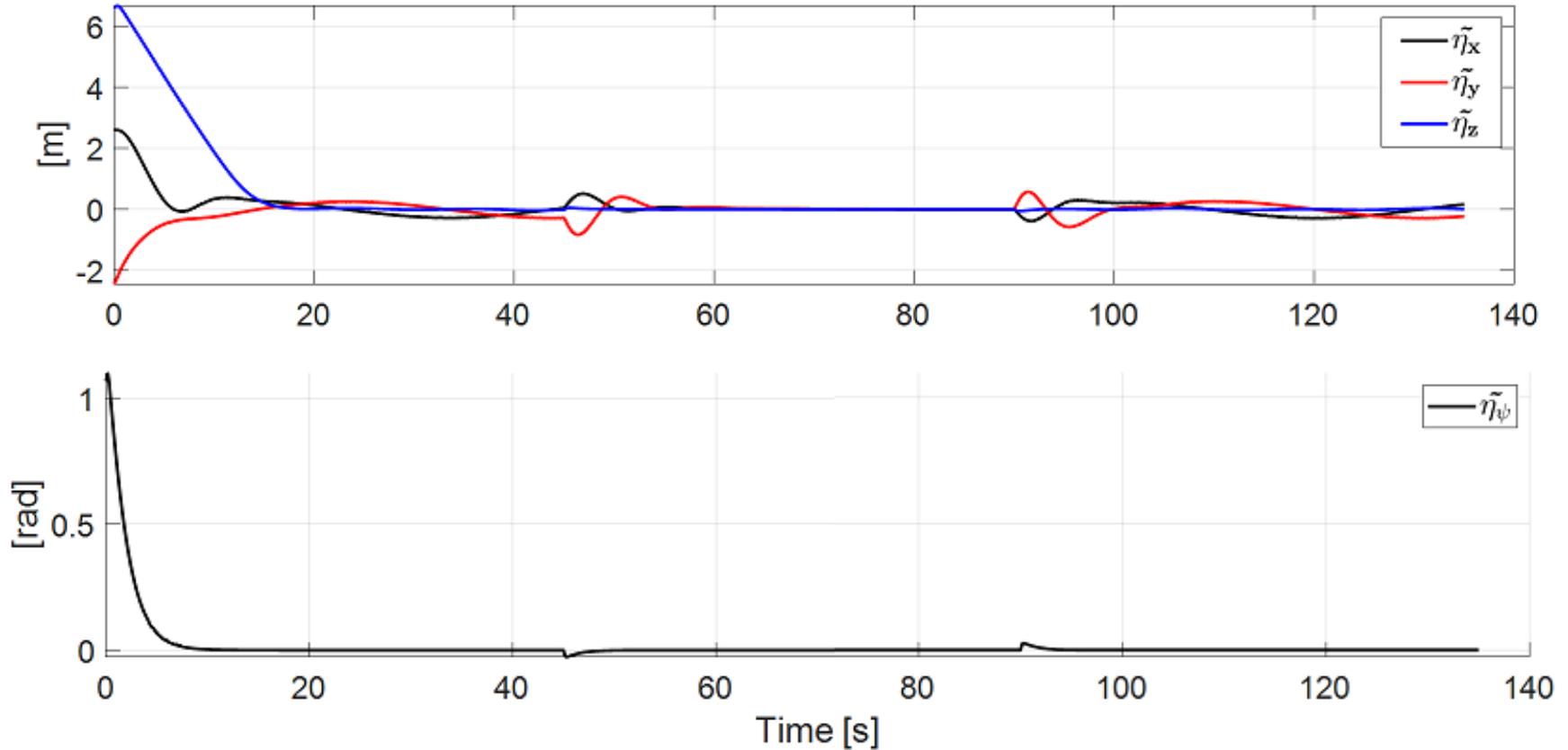
## UAV



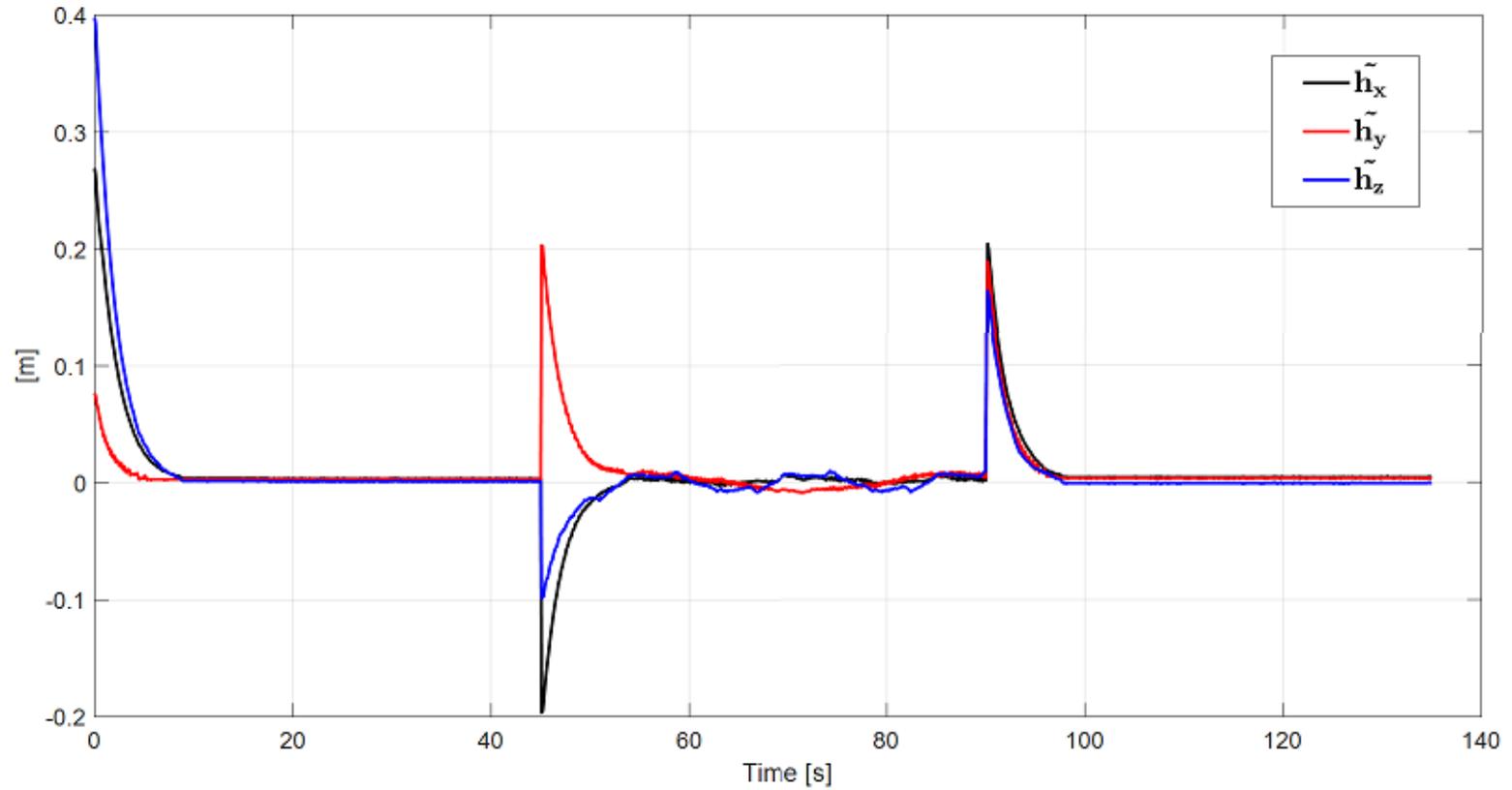
## BRAZO ROBÓTICO



## ERRORES DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA DEL UAV



## ERRORES DE CONTROL DE POSICIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO





- Los modelos **matemáticos** permiten corroborar el desempeño del algoritmo de **control propuesto** al considerar la cinemática del robot manipulador aéreo. De esta manera se expresan las **características** y **restricciones** de movimiento mediante la **cinemática directa** para su validación a través de pruebas experimentales con el **UAV** DJI Matrice 600 Pro y el **brazo robotico** de 3DOF.
- El controlador **desacoplado** basado en la cinemática del robot ha permitido plantear **tareas** independientes de **navegación** y **manipulación** para el **UAV** y el **brazo robótico** respectivamente.
- Mediante **pruebas experimentales** se puede observar como el controlador mantiene **errores** en cero presentando una mejor **estabilidad** cuando existe **perturbaciones externas** producidas por corrientes de aire mediante su ejecución de las **tareas**.



**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 DESACOPLADO DE UN ROBOT MANIPULADOR AÉREO PARA TAREAS  
DE NAVEGACIÓN Y MANIPULACIÓN AUTÓNOMAS**

**Autor:**

Alex Vinicio Guanopatin Claudio

Mgs. Ortiz Moreano, Jessica Sofía, *Directora*

