



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 COOPERATIVO HETEROGÉNEO ENTRE UN ROBOT MÓVIL TERRESTRE
Y UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

Autores:

Alba Margarita Moreno Lovato
Miguel Alexander Velasco Quispe

Mgs. Jessica S. Ortiz, *Tutora*
Ph.D. Víctor H. Andaluz, *CoTutor.*



FTC 2023 - Future Technologies Conference 2023

2-3 November 2023 | San Francisco, United States

Cooperative Control of UGV-UAV with Focus on Teaching-Learning Processes

Miguel A. Velasco, Alba M. Moreno, Jessica S. Ortiz and Victor H. Andaluz

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí Ecuador

{mavelasco8, ammoreno4, jsortiz4, vhandaluz1}@espe.edu.ec

Abstract. This article presents an application based on the learning of cooperative control of robots, for its development is used a 3D environment made in the UNITY 3D software; and a mathematical simulation software MATLAB where advanced control algorithms are developed, this with the objective that the unmanned ground vehicle (UGV) and the unmanned aerial vehicle (UAV) execute an autonomous locomotion and can perform cooperative tasks, analyzing the stability of the proposed control based on the behavior of control errors and showing the effectiveness of the controller, as in previous works are shown training controllers between robot of the same type, in this case the training control is carried out between heterogeneous robots. Finally, the experimental tests are presented with a user iteration and immersion in the virtual environment where the results obtained from the proposed cooperative control are validated, in order to execute the best design of the cooperative controller in the physical omnidirectional terrestrial and unmanned aerial mobile robots obtaining a significant cost reduction in the development of the experimental tests.

Keywords: Learning, Cooperative Control, UNITY 3D, Advanced Control

1 Introduction

Robotics, due to its diverse applications, has been focused in multiple research works as defined in [1],[2],[3]. Robots are found in various fields of knowledge and research: *i)* space exploration, with robots designed for territory reconnaissance and sample collection, such as NASA's Curiosity robot. [2]; *ii)* industrial sector, using robot arms focused on infrastructure construction with higher speed and precision, which are visually controlled, such as the KUKA robot from KUKA AG [3]; *iii)* in health sector, assistance, rehabilitation and operation robots such as the Da Vinci Ro-bot have been created. This robot has presented robots that interact with great accuracy and precision in the intervention with patients [4]; *vi)* in security, QinetiQ's Takon robot has been developed for surveillance on land and in water [5]; *vii)* in transport logistics, there are robots

Acceptance Letter - Future Technologies Conference 2023

Dear Miguel A. Velasco , Alba M. Moreno, Jessica S. Ortiz, Victor H. Andaluz,

Congratulations! Your paper " Cooperative control of UGV-UAV with Focus on Teaching Learning Processes" 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







TIPOS DE ROBOTS

➤ Terrestres

➤ Aéreos

➤ Acuáticos

➤ Híbridos

APLICACIONES

Exploración



Vigilancia



Inspección



Seguridad



Robot terrestres (UGV)



Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)

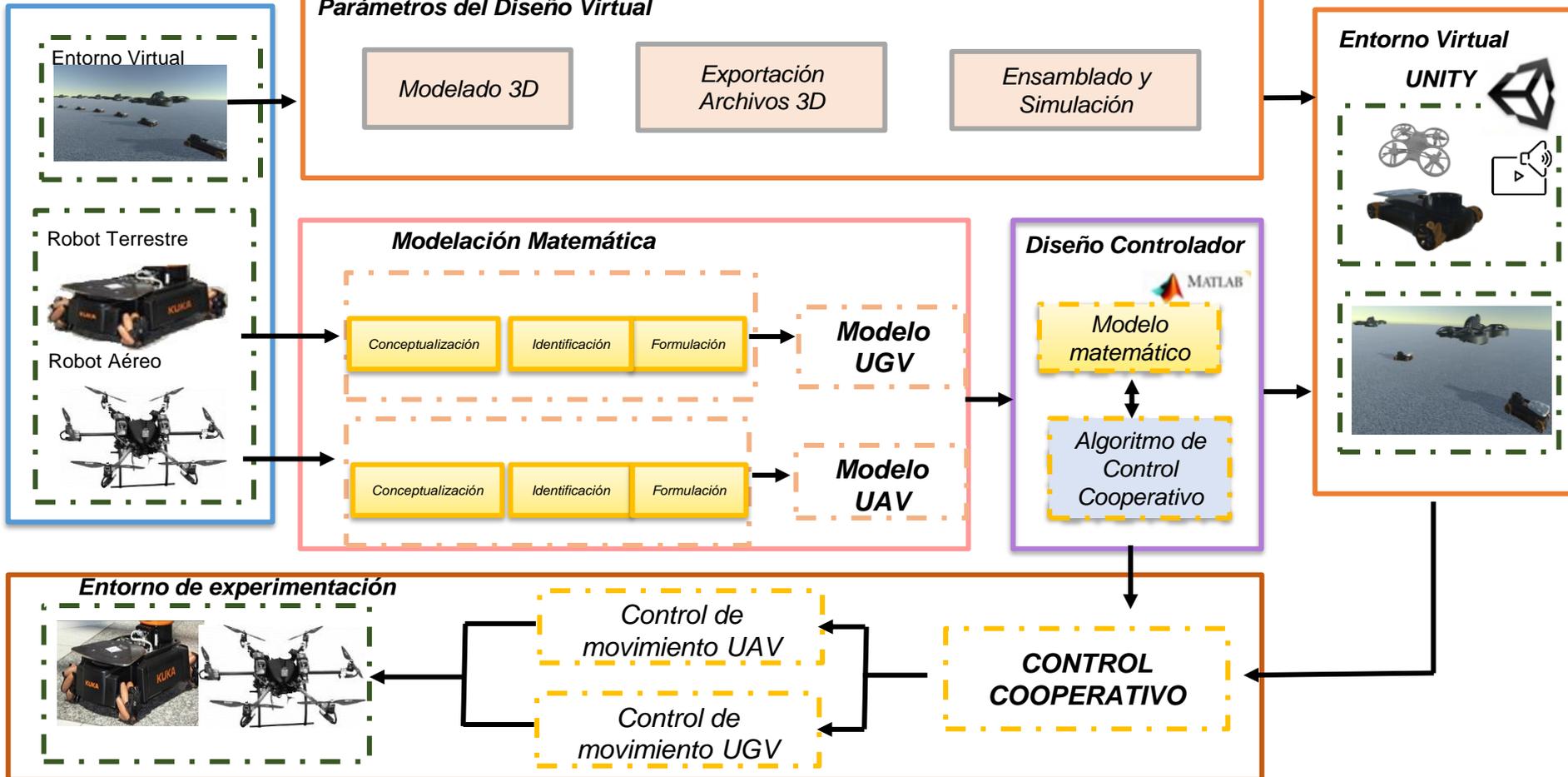


Implementar un esquema de control cooperativo centralizado entre un robot móvil terrestre y un vehículo aéreo no tripulado, a fin de **ejecutar tareas colaborativas.**

- **Investigar** en las diversas bases de datos científicas acerca de la **modelación y esquemas de control** de robots móviles terrestres y aéreos.
- **Determinar el modelo matemático** que represente las **características y restricciones del movimiento** de un robot móvil **terrestre**.
- **Determinar el modelo matemático** que represente las **características y restricciones del movimiento** de un vehículo **aéreo** no tripulado.

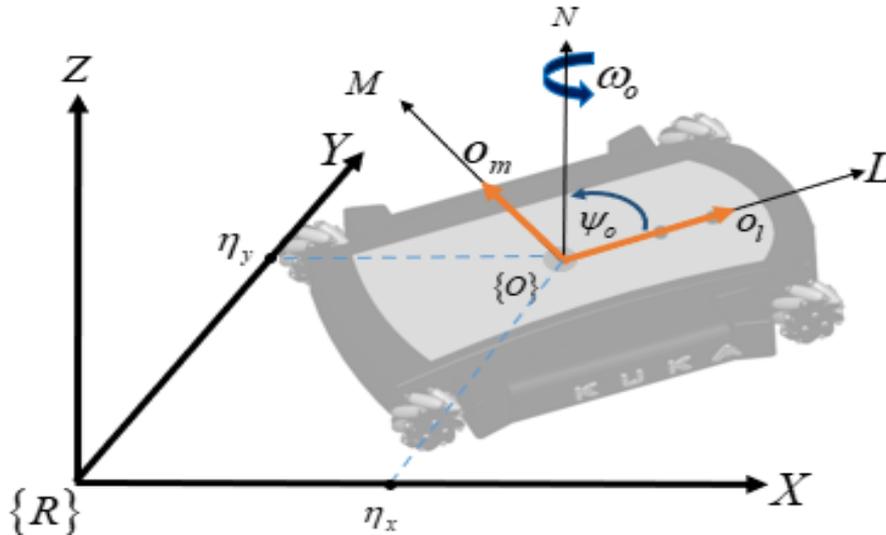
- **Proponer un esquema de control multivariable** para ejecutar tareas autónomas de formación entre un robot móvil terrestre y robot móvil aéreo. El esquema de control deberá estar **conformado por un sistema en cascada** que considere: un **control de formación centralizado** y un **control no lineal** para cada uno de los robots móviles.
- **Analizar la estabilidad** de esquema de control propuesto, con el propósito de **evaluar el comportamiento de los errores** de control.
- **Desarrollar pruebas experimentales** considerando un robot móvil y un robot móvil aéreo, a fin de **evaluar el desempeño del esquema de control** de formación propuesto a través de los **errores de control**.

Recursos





Robot UGV- Omnidireccional



Resulta:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{J}_o(\psi_o) \mathbf{v}_o(t) \quad (1)$$

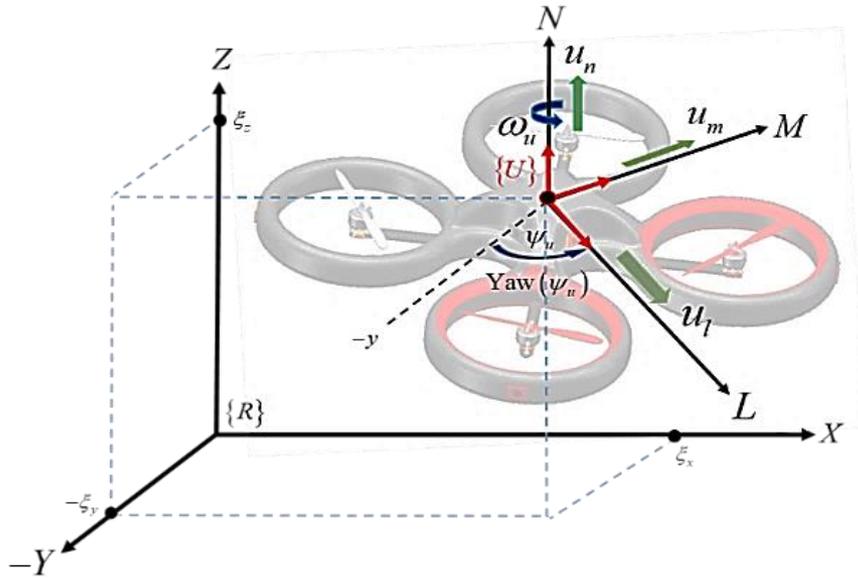
$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t)$ Vector de velocidades

$\mathbf{J}_o(\psi_o)$ Matriz comportamiento de movimiento

$\mathbf{v}_o(t)$ Vector de maniobrabilidad

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_x \\ \dot{\eta}_y \\ \dot{\eta}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_o) & -\sin(\psi_o) & 0 \\ \sin(\psi_o) & \cos(\psi_o) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} o_l \\ o_m \\ \omega_o \end{bmatrix}$$

Robot UAV- Cuadrirrotor



Resulta:

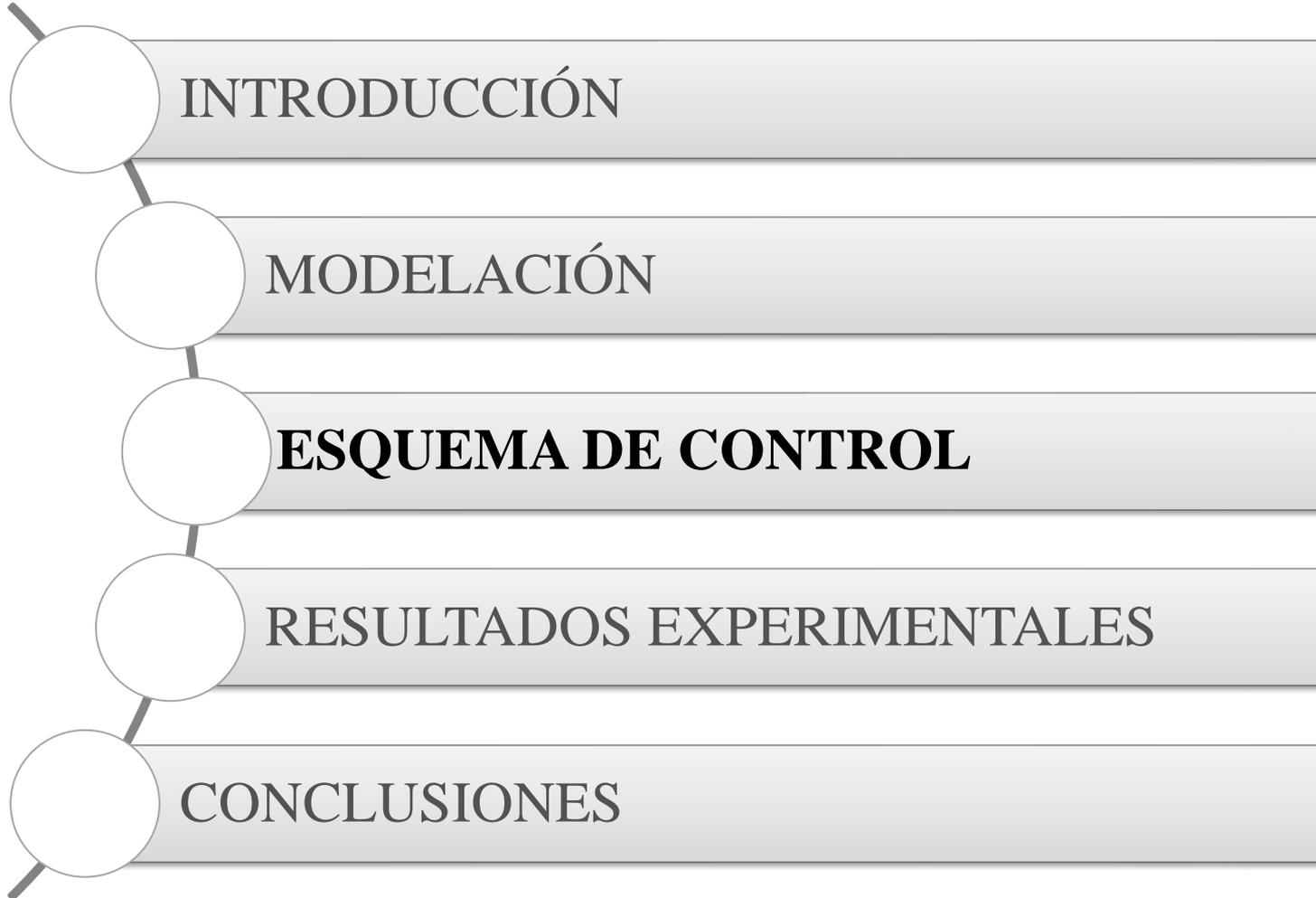
$$\dot{\xi}(t) = \mathbf{J}_u(\psi_u) \mathbf{v}_u(t) \quad (2)$$

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

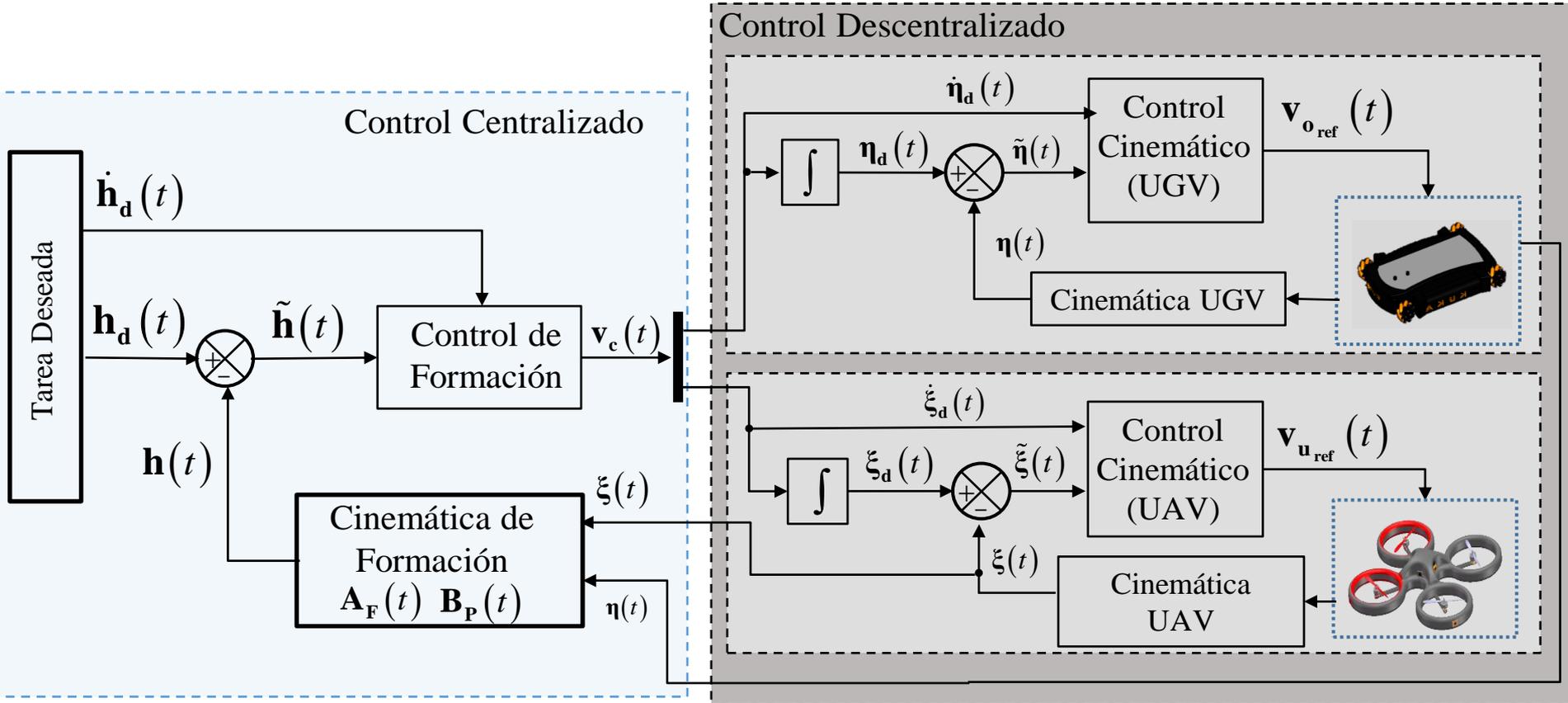
$\mathbf{J}(\psi)$ Matriz comportamiento de vuelo

$\mu(t)$ Vector de maniobrabilidad

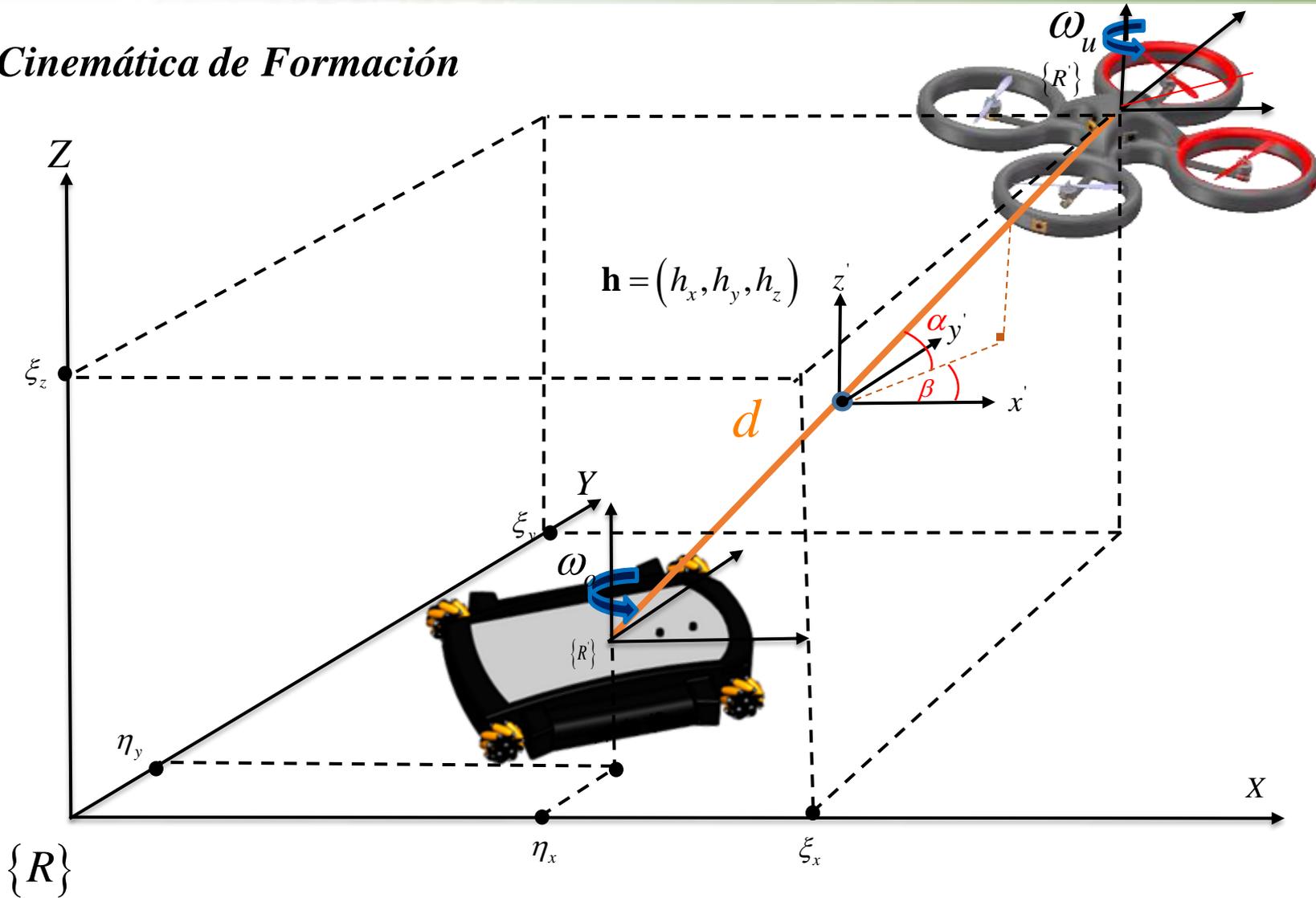
$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ \dot{\xi}_z \\ \dot{\xi}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_u) & -\sin(\psi_u) & 0 & 0 \\ \sin(\psi_u) & \cos(\psi_u) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_l \\ u_m \\ u_n \\ \omega_u \end{bmatrix}$$



ESQUEMA DE CONTROL



Cinemática de Formación



Matriz de Posición:

$$\mathbf{B}_p(t) = \begin{bmatrix} h_x(t) \\ h_y(t) \\ h_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(\eta_x + \xi_x) \\ \frac{1}{2}(\eta_y + \xi_y) \\ \frac{1}{2}(\eta_z + \xi_z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Matriz de Formación:

$$\mathbf{A}_F(t) = \begin{bmatrix} d(t) \\ \alpha(t) \\ \beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(\xi_x - \eta_x)^2 + (\xi_y - \eta_y)^2 + (\xi_z - \eta_z)^2} \\ \tan^{-1} \left(\frac{\xi_z - \eta_z}{\sqrt{(\xi_x - \eta_x)^2 + (\xi_y - \eta_y)^2}} \right) \\ \tan^{-1} \left(\frac{\xi_y - \eta_y}{\xi_x - \eta_x} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Modelo Cinemático de Formación

Forma

$$\dot{\mathbf{A}}_{\mathbf{F}}(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \dot{d}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\mathbf{F}} \mathbf{v}_{\mathbf{c}}(\mathbf{t}) \quad (5)$$

Posición

$$\dot{\mathbf{B}}_{\mathbf{p}}(\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \dot{h}_x(t) \\ \dot{h}_y(t) \\ \dot{h}_z(t) \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\mathbf{P}} \mathbf{v}_{\mathbf{c}}(\mathbf{t}) \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\mathbf{P}} \\ \mathbf{J}_{\mathbf{F}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{\mathbf{PF}} \dot{\mathbf{h}}_{\mathbf{c}}(t) \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{h}}(t) \in \mathcal{R}^6 \quad \mathbf{J}_{\mathbf{PF}} \in \mathcal{R}^{6 \times 5}$$

Ley de Control de Formación (Control Centralizado)

$$\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{J}_{\text{PF}}^+ \left(\dot{\mathbf{h}}_d(t) + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_{\text{PF}}^+ \in \mathcal{R}^{5 \times 6}$$

Matriz jacobiana

$$\dot{\mathbf{h}}_d \in \mathcal{R}^6$$

Derivada de las posiciones deseadas

$$\mathbf{K} \in \mathcal{R}^{6 \times 6}$$

Matriz diagonal de ganancia

$$\tilde{\mathbf{h}} \in \mathcal{R}^6$$

Representa los errores de control

Ley de Controlador No Lineal (UGV)

$$\mathbf{v}_{o_{\text{ref}}}(t) = \mathbf{J}_o^{-1} \left(\dot{\mathbf{q}}_d(t) + \mathbf{K}_o \tilde{\mathbf{q}}(t) \right) \quad (9)$$

$\mathbf{J}_o^{-1} \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ Matriz inversa jacobiana

$\dot{\mathbf{q}}_d \in \mathcal{R}^3$ Derivada de las posiciones deseadas

$\mathbf{K}_o \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ Matriz diagonal de ganancia

$\tilde{\mathbf{q}} \in \mathcal{R}^3$ Representa los errores de control

Ley de Controlador No Lineal (UAV)

$$\mathbf{v}_{\mathbf{u}_{\text{ref}}}(t) = \mathbf{J}_{\mathbf{u}}^{-1} \left(\dot{\boldsymbol{\xi}}_{\text{d}}(t) + \mathbf{K}_{\mathbf{u}} \tilde{\boldsymbol{\xi}}(t) \right) \quad (10)$$

$$\mathbf{J}_{\mathbf{u}}^{-1} \in \mathcal{R}^{4 \times 4}$$

Matriz inversa jacobiana

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_{\text{d}} \in \mathcal{R}^4$$

Derivada de las posiciones deseadas

$$\mathbf{K}_{\mathbf{u}} \in \mathcal{R}^{4 \times 4}$$

Matriz diagonal de ganancia

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}} \in \mathcal{R}^4$$

Representa los errores de control

Ecuación de Lazo Cerrado:

Proceso:
$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_P \\ \mathbf{J}_F \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{PF} \dot{\mathbf{h}}_c(t) \quad (11)$$

Ley de Control:
$$\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{J}_{PF}^+ \left(\dot{\mathbf{h}}_d(t) + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) \right) \quad (12)$$

con :
$$\tilde{\mathbf{h}}(t) = \left(\mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t) \right) \rightarrow \mathbf{0}$$

Seguimiento perfecto de velocidad
$$\dot{\mathbf{h}}(t) \equiv \mathbf{v}_c(t)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t) + \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{0} \quad (13)$$

Candidata de Lyapunov:

Su derivada

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T(t) \tilde{\mathbf{h}}(t) \quad \longrightarrow \quad \dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T(t) \dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t) \quad (14)$$

Ecuación de Lazo Cerrado (ELC)

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t) = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) \quad (15)$$

Relacionado la ELC con $\dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t)$

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

Por lo tanto :

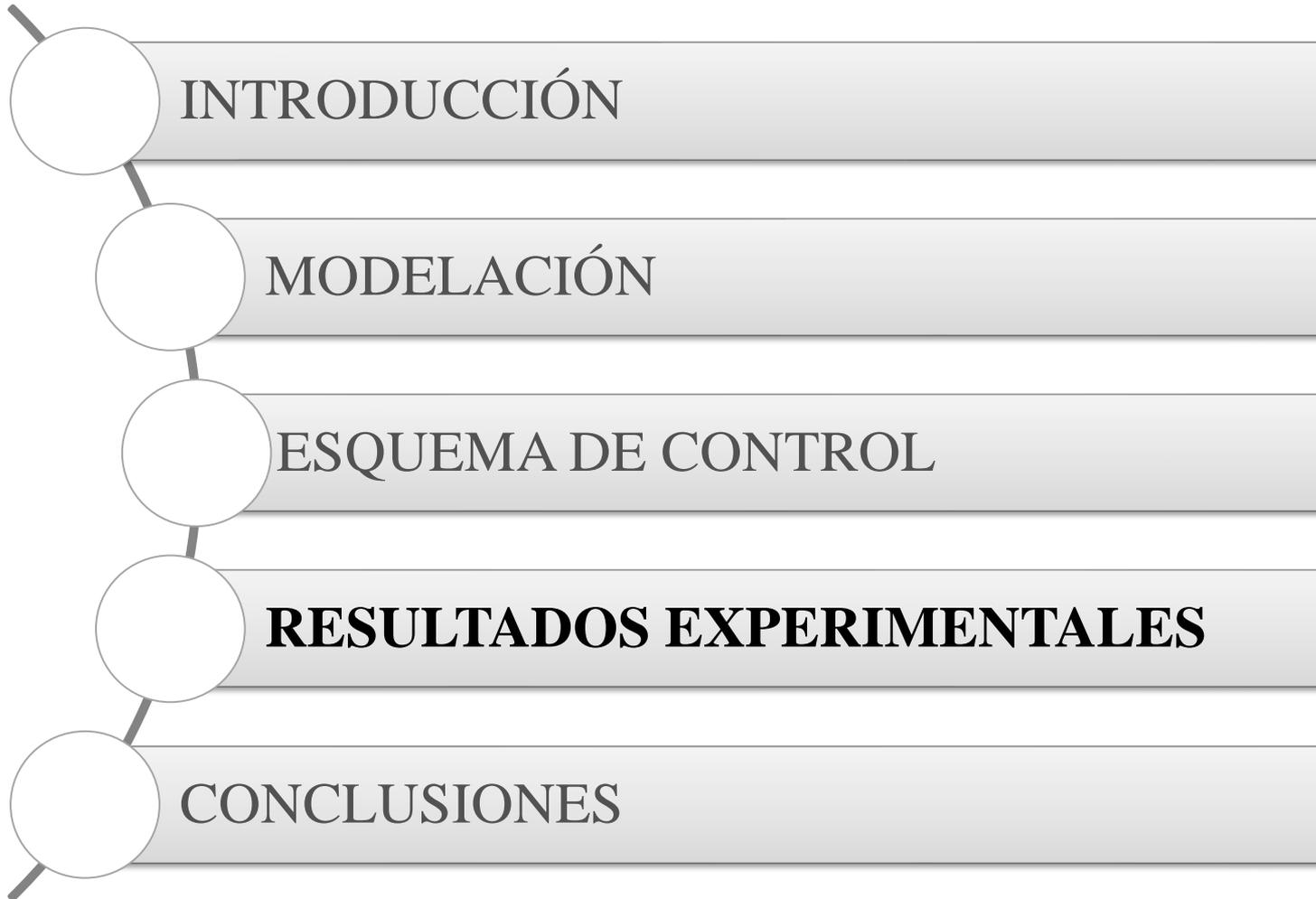
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{h}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$$

con

$$\mathbf{K} > 0$$

(17)

Nota: Con este mismo análisis se demuestra la estabilidad de los controladores descentralizados de cada robot.



DJI Phantom 4 Pro



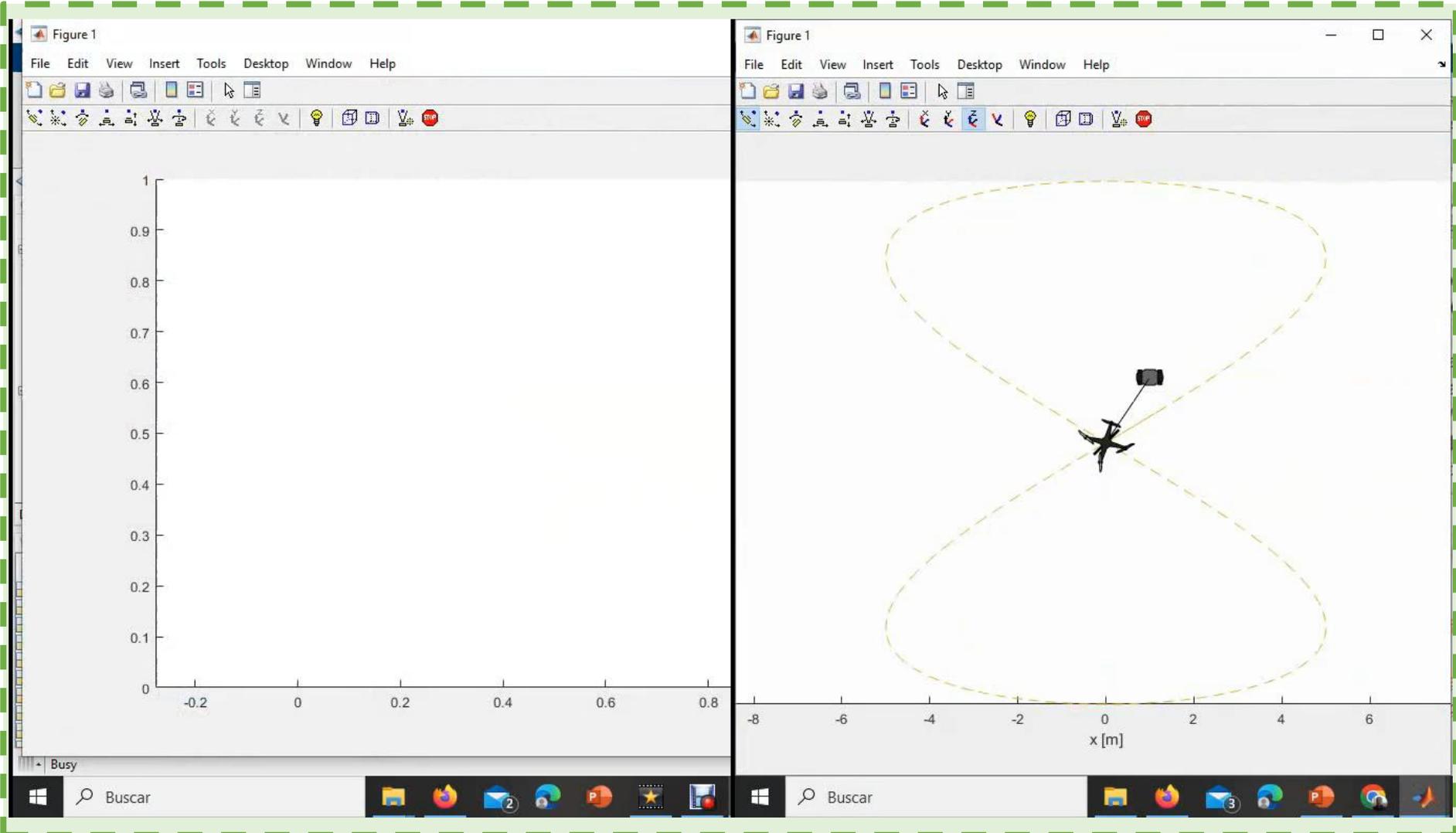
- Peso(Incluido batería) 13890 g
- Máxima velocidad de subida 6m/s(Mod Sport)
Máxima velocidad de descenso 4m/s(Mod Sport)
Velocidad máxima 20m/s(Mod Sport)
Máximo tiempo de vuelo Aprox. 28 minutos.
Rango de temperatura de funcionamiento 32° to 104° F (0° to 40° C)
Sistemas de satélites GPS/GLONASS

Robot móvil Omnidireccional



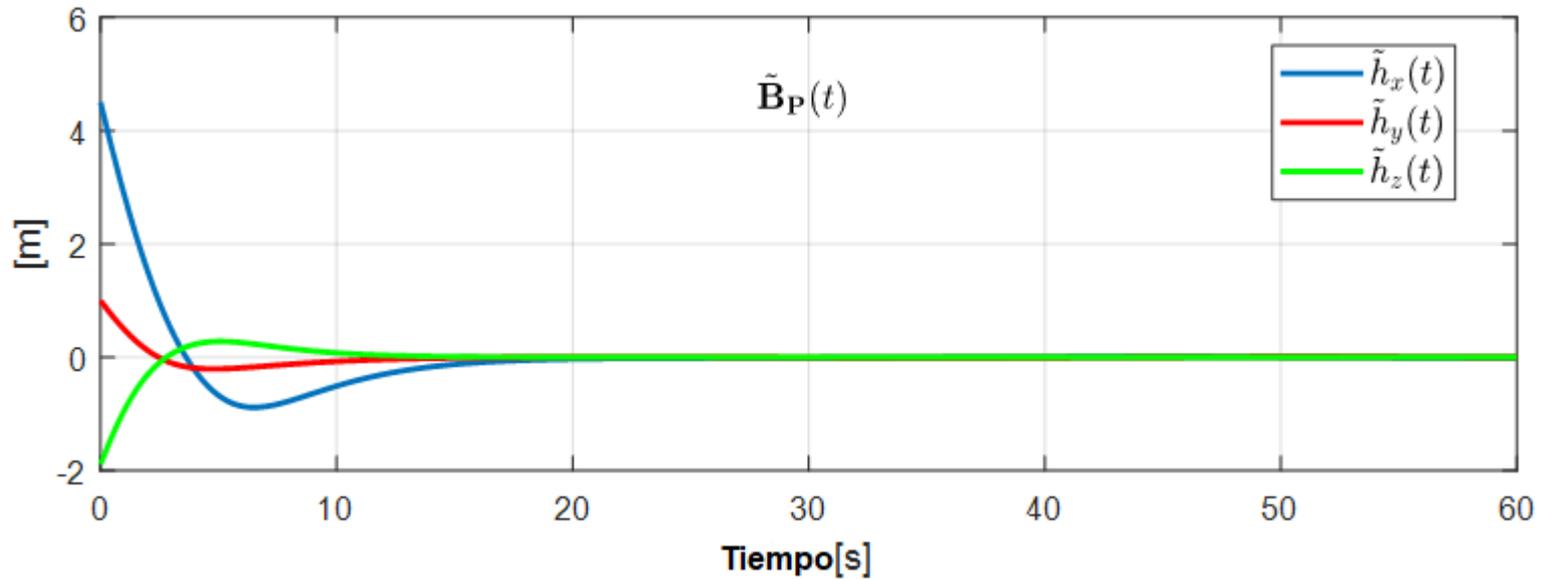
- Rango de comunicación de 5 Km
- Capacidad de carga hasta 2kg
- 1 baterías LiPo 3S 12,8 V y 2700 mAh
- Autonomía de 30 minutos
- 4 sensores Encoder
- 126 rpm
- Ancho 22,5 cm
- Largo 24,5 cm
- Diámetro ruedas 8cm

PRUEBAS DE SIMULACIÓN 3D

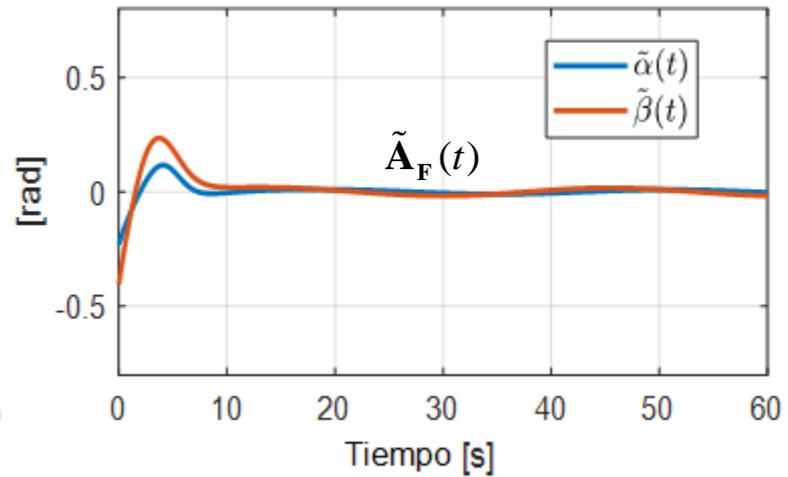
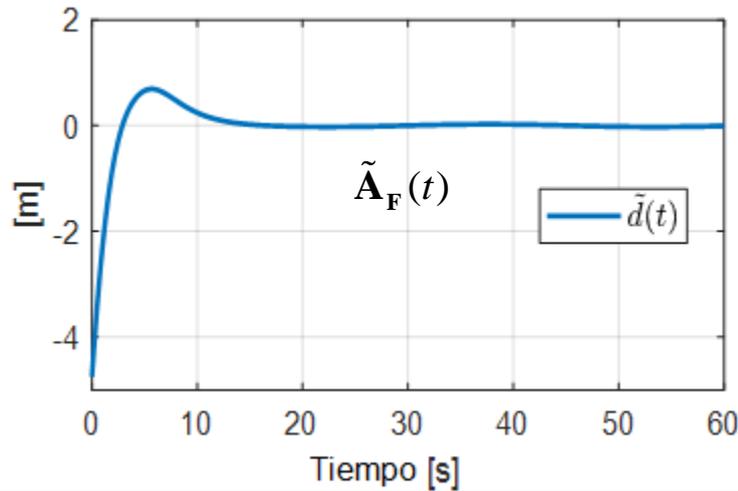


ERRORES DEL CONTROL DE FORMACIÓN

Posición

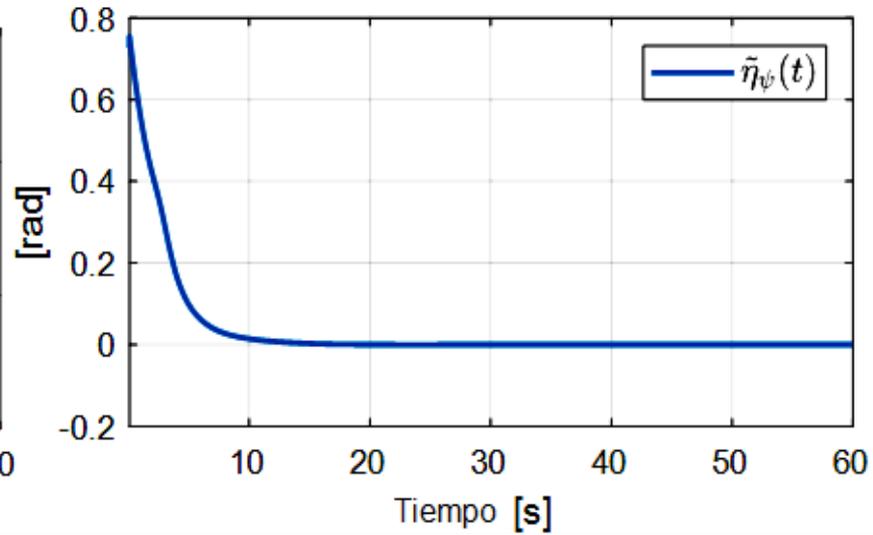
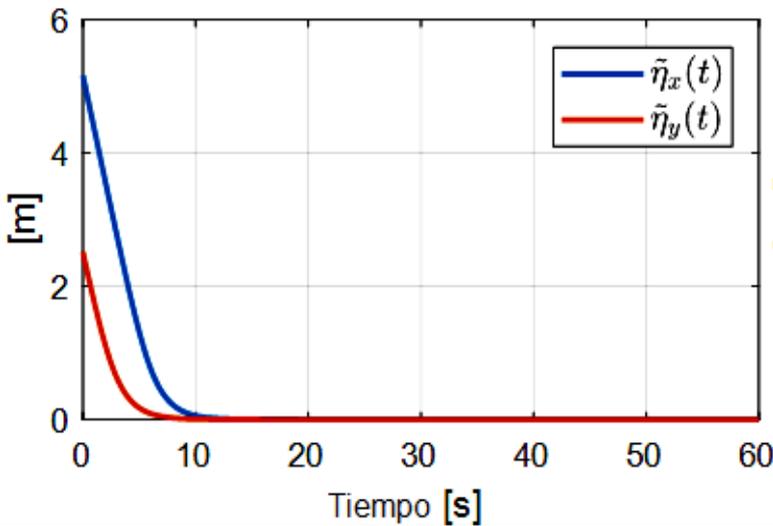
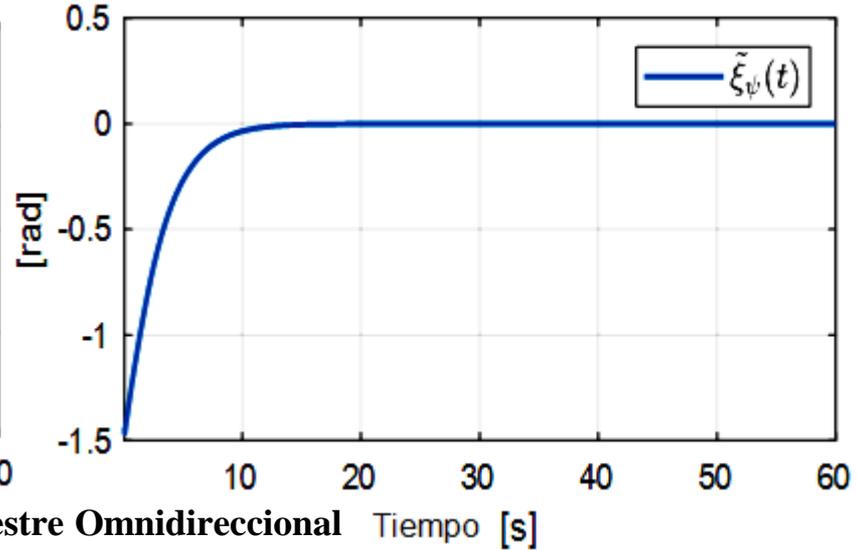
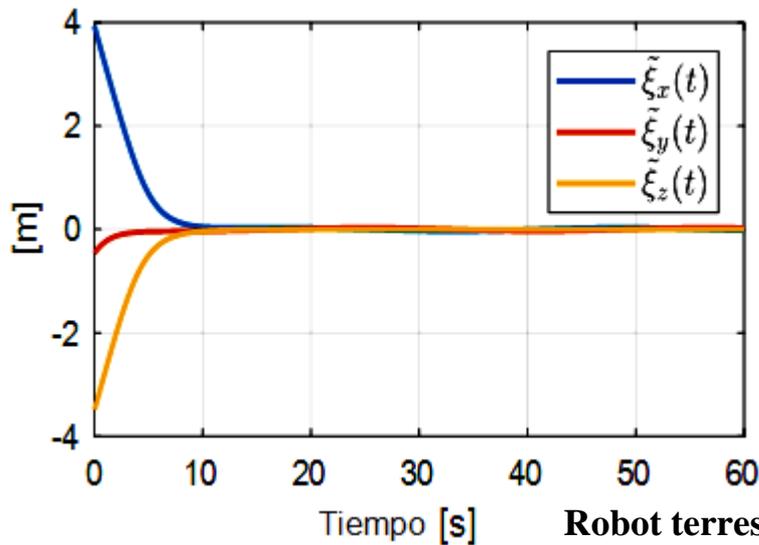


Forma



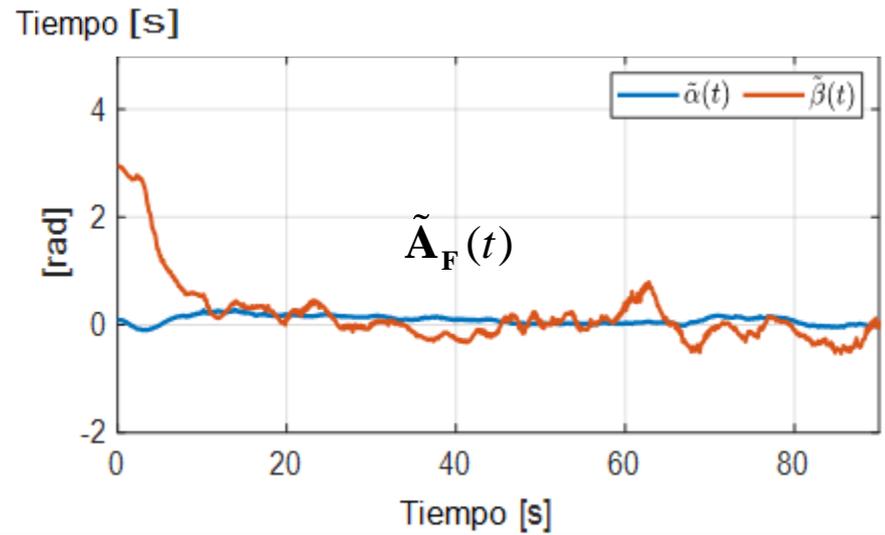
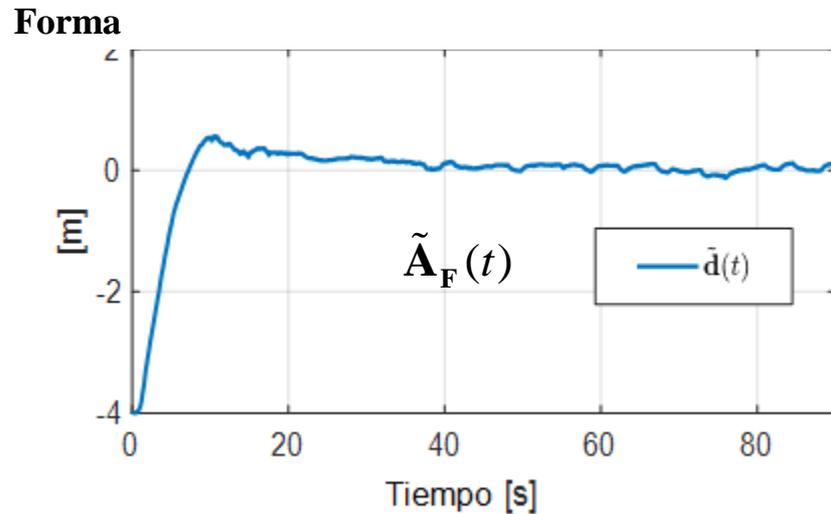
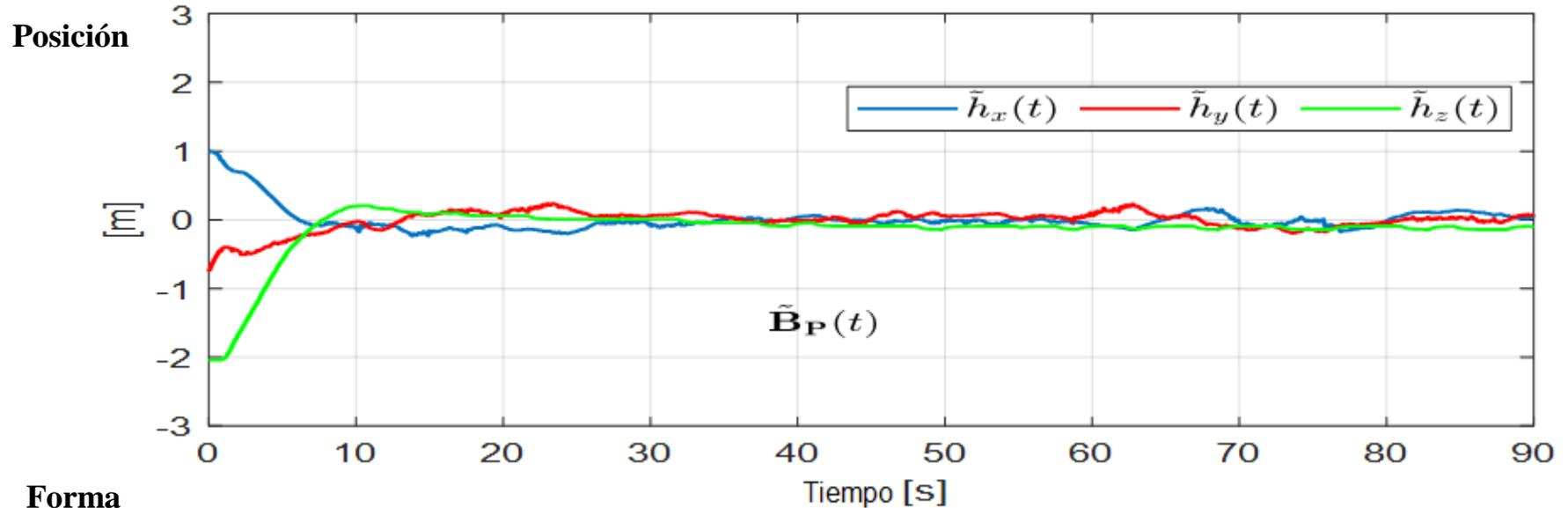
ERRORES DE CONTROL CINEMÁTICO

Cuadricóptero Phantom 4 Pro

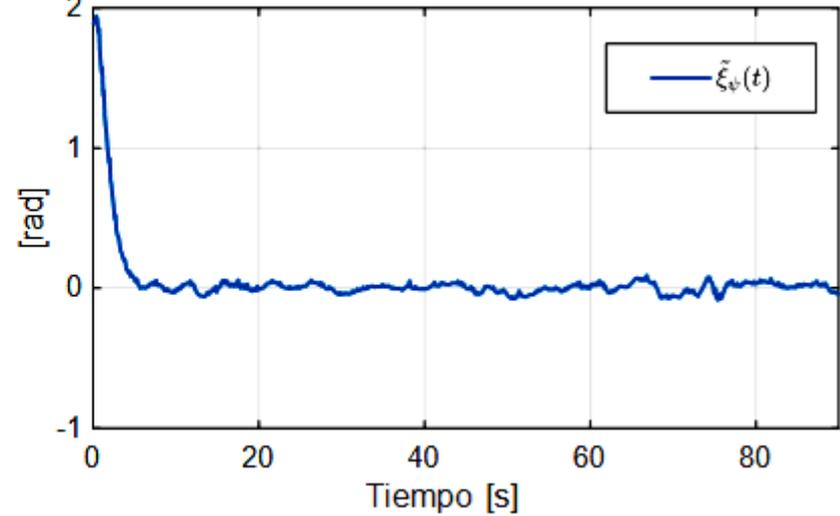
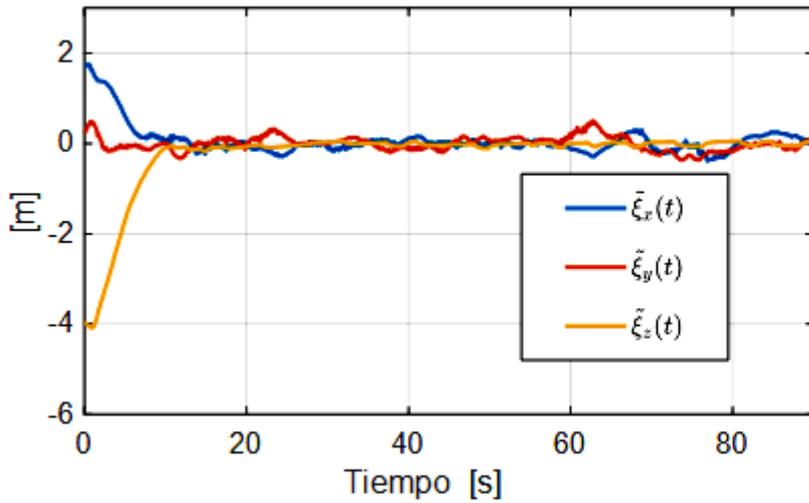




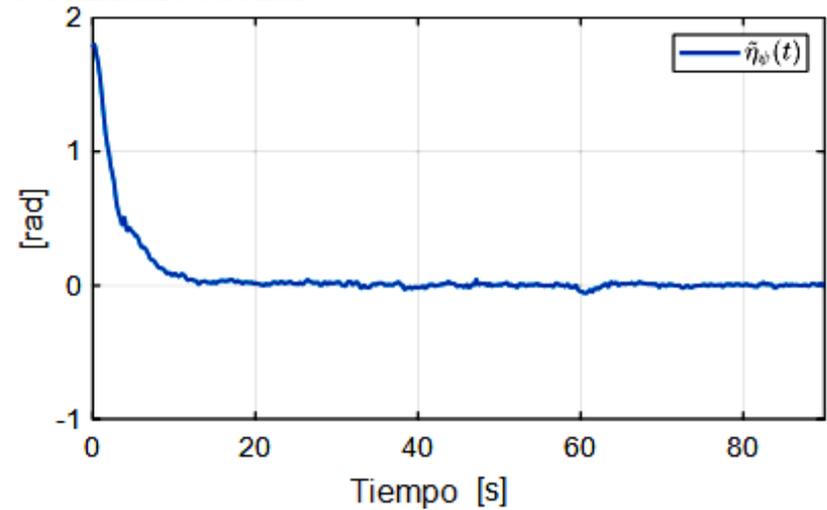
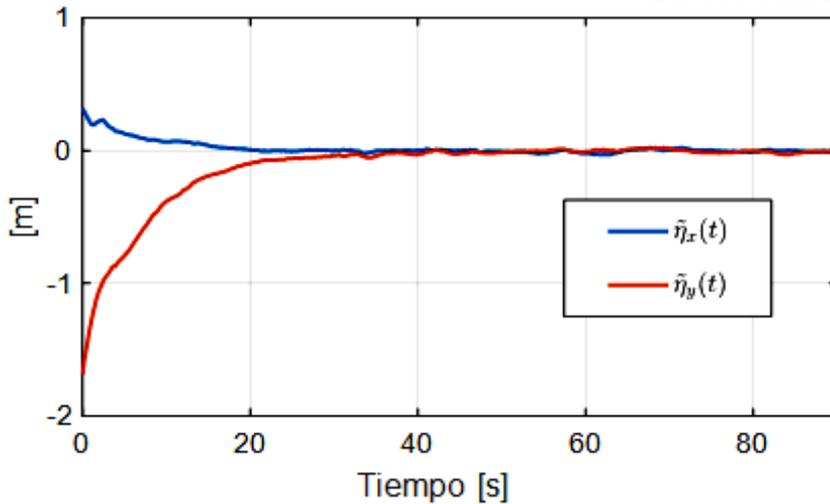
ERRORES DE CONTROL DE FORMACIÓN

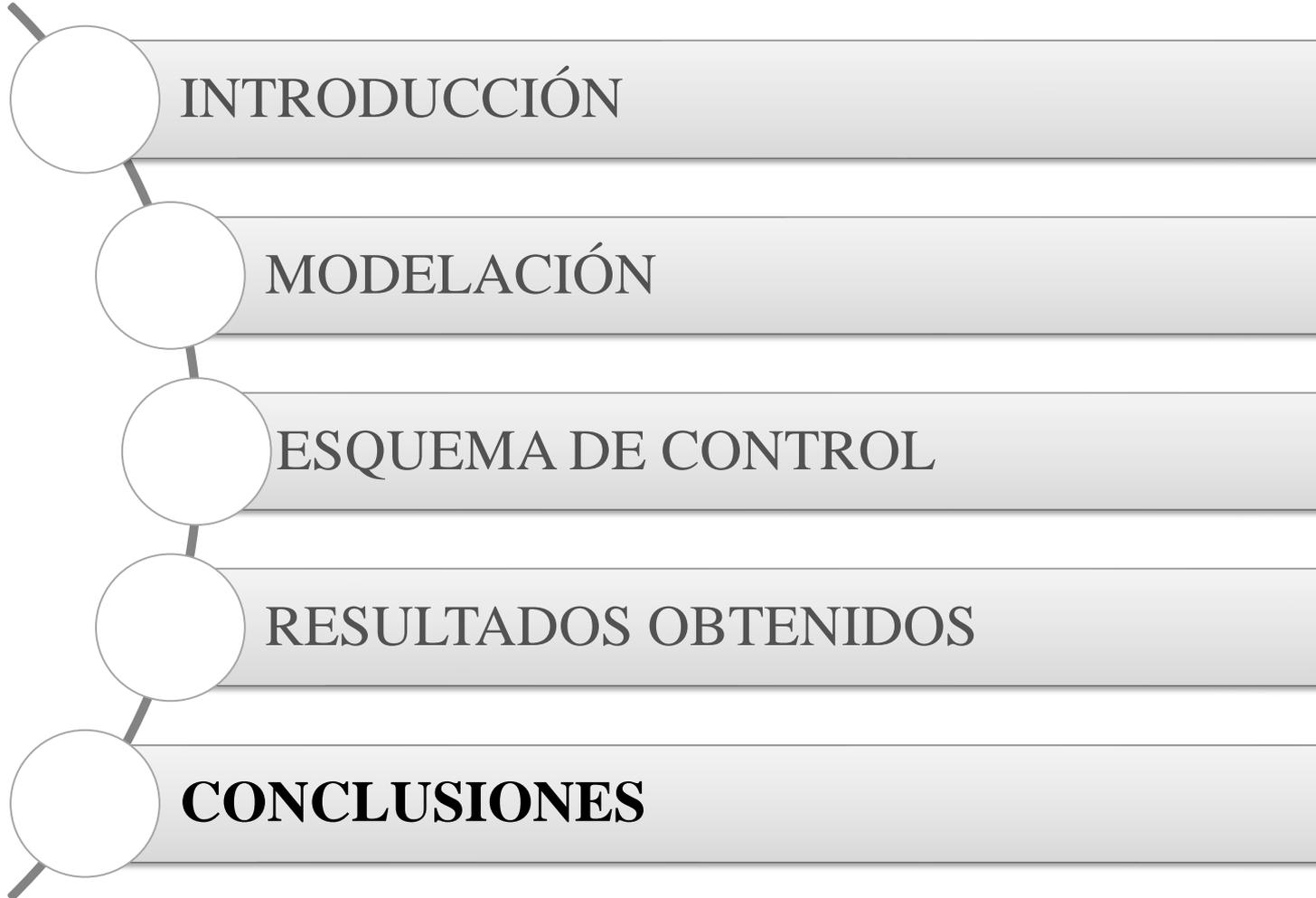


Cuadricóptero Phantom 4 Pro



Robot terrestre Omnidireccional





- El esquema de **control cooperativo** utiliza un sistema **multicapas** en cascada, permitiendo **acoplar** diferentes **habilidades motrices** de un robot terrestre y un vehículo aéreo no tripulado para ejecutar **tareas complejas autónomas** de manera eficaz y eficiente.
- El **modelo matemático del UAV y UGV**, permiten **representa la cinemática de cada robot** con sus características de movilidad y restricciones del comportamiento, teniendo en cuenta los **componentes reales**.
- Mediante el **análisis de estabilidad** es posible verificar que los **errores de control de formación** y los **errores de control de cada robot tienden a cero**, determinando que los controladores implementados son **asintóticamente estables**.
- A través de los resultados de las **pruebas experimentales** se demostró que el sistema es estable y que además se pueden **incorporar un control de formación con múltiples robots**, e incluir en posteriores trabajos otros tipos de **robots heterogéneos**.



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 COOPERATIVO HETEROGÉNEO ENTRE UN ROBOT MÓVIL TERRESTRE
Y UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

Autores:

Alba Margarita Moreno Lovato
Miguel Alexander Velasco Quispe

Mgs. Jessica S. Ortiz, *Tutora*
Ph.D. Víctor H. Andaluz, *CoTutor.*

