# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

## CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

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

# CONTROL NO LINEAL DE ROBOTS MANIPULADORES AÉREOS BASADO EN MÉTODOS NUMÉRICOS

**Autores:**
Alegría Vizuete, Jaime Alejandro
Grijalva López, David Fernando

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. ***Tutor***
Ing. César A. Naranjo, Mg. ***Cotutor***

# IEA/AIE 2020

The 33th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems

21-24, July, 2020 --> 22-25, September, 2020 (postponed!)

Kitakyushu, JAPAN

## Non-linear Control of Aerial Manipulator Robots Based on Numerical Methods

David F. Grijalva(✉), Jaime A. Alegría(✉), Víctor H. Andaluz(✉),
and Cesar Naranjo(✉)

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
{dfgrijalva,jaalegria,vhandaluz1,canaranjo}@espe.edu.ec

**Abstract.** This work proposes a kinematic modelling and a non-linear kinematic controller for an autonomous aerial mobile manipulator robot that generates velocity commands for trajectory tracking problem. The kinematic modelling is considered using a hexarotor system and robotic arm. The stability and robustness of the entire control system are tested by this method. Finally, the experiment results are presented and discussed, and validate the proposed controller.

**Keywords:** Aerial manipulator · AMR · Control no lineal

### 1 Introduction

Robotics has greatly evolved and is now present in several areas of the industrial field, as well as the service robotics, where a wide study and research field exists due to its several applications, such as: robotic service assistant in nursing [1]; service robotics with social conscience for guiding and helping passengers in airports [2]; robotics for home assistance [3]; service robot used for preventing collisions [4]. Service robots may present unexpected behaviors that represent economic and safety risks, especially for the human staff around them [5], because of the wide operating field of service robots, some structures have been developed so that they can work in land, water and aerial environments, therefore, they can use wheels, legs, and propellers, as its application requires. For service robotics, one of the main workplaces are locations where there are only flat surfaces for movement, so in order to cover these locations, unmanned aerial vehicles are used (UAV) [6].

Unmanned aerial vehicles, also known as drones, are flying objects that are not manned by a pilot [7]. Aerial vehicles have been under research lately [8] generating several applications, like search and rescue operations, surveillance, handling or grabbing tasks, in which it is needed to include a robotic arm that can limit the vehicle from executing more complex and precise tasks.

The combination of mobile aerial systems with robotic arms is known as aerial mobile manipulators [9], which are a type of unmanned aerial vehicles with the ability to physically interact within an ideally unlimited workspace [6]. The most often used platforms for aerial mobile manipulators are helicopter-type or multirotor with their different varieties: quadrotor, hexarotor or octorotor, combined with robotic arms with

H. Fujita et al. (Eds.): IEA/AIE 2020, LNAI 12144, pp. 97–107, 2020.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_9

Check for updates

International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems
└ IEA/AIE 2020: Trends in Artificial Intelligence Theory and Applications. Artificial Intelligence Practices pp 97-107
| Cite as

Non-linear Control of Aerial Manipulator Robots Based on Numerical Methods

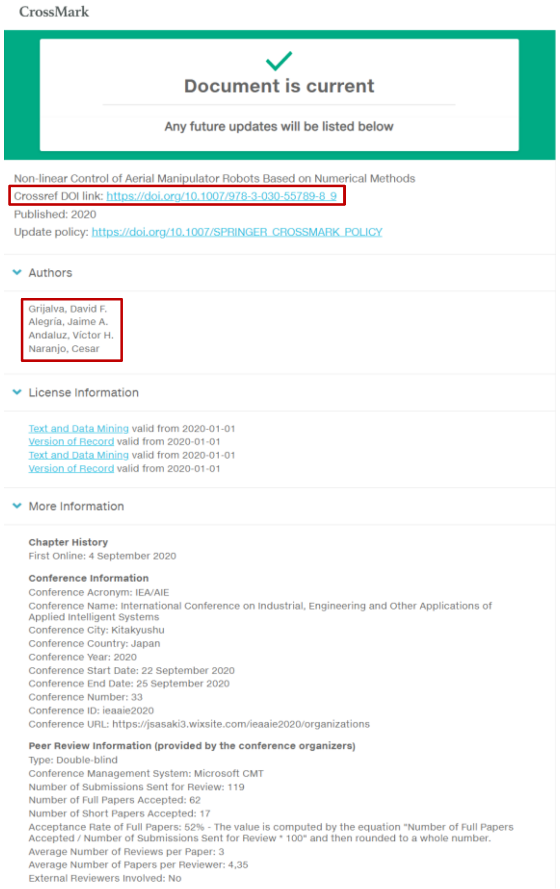
Authors | Authors and affiliations

David F. Grijalva ✉, Jaime A. Alegría ✉, Víctor H. Andaluz ✉, Cesar Naranjo ✉

Conference paper
**First Online:** 04 September 2020

602
Downloads

Part of the Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS, volume 12144)



CrossMark

✓
Document is current

Any future updates will be listed below

Non-linear Control of Aerial Manipulator Robots Based on Numerical Methods
Crossref DOI link: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_9
Published: 2020
Update policy: https://doi.org/10.1007/SPRINGER_CROSSMARK_POLICY

Authors

Grijalva, David F.
Alegria, Jaime A.
Andaluz, Victor H.
Naranjo, Cesar

License Information

Text and Data Mining valid from 2020-01-01
Version of Record valid from 2020-01-01
Text and Data Mining valid from 2020-01-01
Version of Record valid from 2020-01-01

More Information

**Chapter History**
First Online: 4 September 2020

**Conference Information**
Conference Acronym: IEA/AIE
Conference Name: International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems
Conference City: Kitakyushu
Conference Country: Japan
Conference Year: 2020
Conference Start Date: 22 September 2020
Conference End Date: 25 September 2020
Conference Number: 33
Conference ID: ieaaie2020
Conference URL: https://jsasaki3.wixsite.com/ieaaie2020/organizations

**Peer Review Information (provided by the conference organizers)**
Type: Double-blind
Conference Management System: Microsoft CMT
Number of Submissions Sent for Review: 119
Number of Full Papers Accepted: 62
Number of Short Papers Accepted: 17
Acceptance Rate of Full Papers: 52% - The value is computed by the equation "Number of Full Papers Accepted / Number of Submissions Sent for Review * 100" and then rounded to a whole number.
Average Number of Reviews per Paper: 3
Average Number of Papers per Reviewer: 4,35
External Reviewers Involved: No

# IEA/AIE 2020

The 33th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems

~~21-24, July, 2020~~ --> 22-25, September, 2020 (postponed!)

Kitakyushu, JAPAN

**UNIVERSITY OF THE ARMED FORCES– ESPE**
**ELECTRICAL AND ELECTRONICS DEPARTMENT**

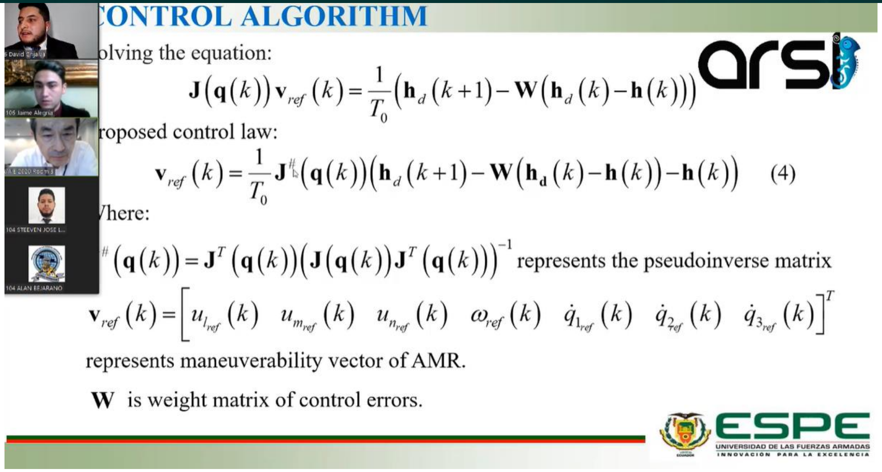
**ELECTRONIC AND INSTRUMENTATION ENGINEERING**

## Non-Linear Control of Aerial Manipulator Robots Based on Numerical Methods

**Authors:**

| | |
|---|---|
| David F. Grijalva | (dfgrijalva@espe.edu.ec) |
| Jaime A. Alegria | (jaalegria@espe.edu.ec) |
| Victor H. Andaluz | (vhandaluz1@espe.edu.ec) |
| Cesar Naranjo | (canaranjo@espe.edu.ec) |

**International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems**
**IEA/AIE 2020**



## CONTROL ALGORITHM

olving the equation:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}(k))\mathbf{v}_{ref}(k)=\frac{1}{T_0}\left(\mathbf{h}_d(k+1)-\mathbf{W}\left(\mathbf{h}_d(k)-\mathbf{h}(k)\right)\right)$$

roposed control law:

$$\mathbf{v}_{ref}(k)=\frac{1}{T_0}\mathbf{J}^{\#}(\mathbf{q}(k))\left(\mathbf{h}_d(k+1)-\mathbf{W}\left(\mathbf{h}_\mathbf{d}(k)-\mathbf{h}(k)\right)-\mathbf{h}(k)\right) \qquad (4)$$

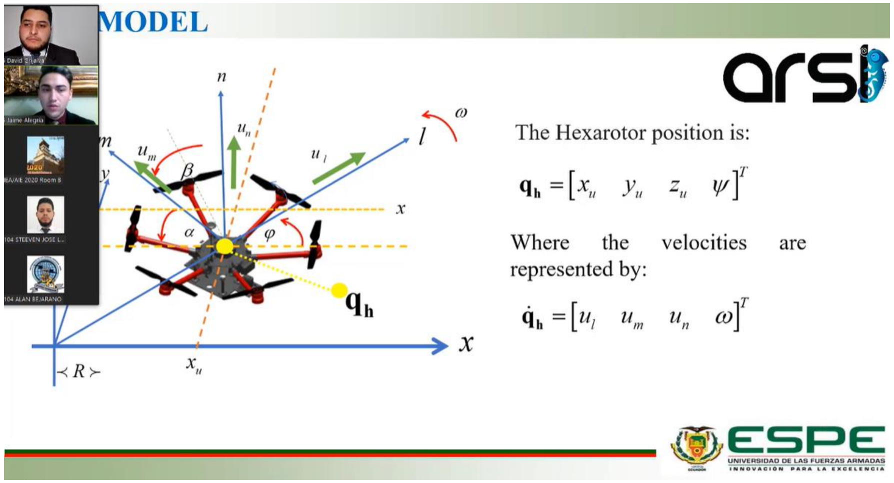
here:

$^{\#}(\mathbf{q}(k))=\mathbf{J}^T(\mathbf{q}(k))\left(\mathbf{J}(\mathbf{q}(k))\mathbf{J}^T(\mathbf{q}(k))\right)^{-1}$ represents the pseudoinverse matrix

$\mathbf{v}_{ref}(k)=\begin{bmatrix}u_{l_{ref}}(k) & u_{m_{ref}}(k) & u_{n_{ref}}(k) & \omega_{ref}(k) & \dot{q}_{1_{ref}}(k) & \dot{q}_{2_{ref}}(k) & \dot{q}_{3_{ref}}(k)\end{bmatrix}^T$

represents maneuverability vector of AMR.

$\mathbf{W}$ is weight matrix of control errors.



## MODEL

The Hexarotor position is:

$$\mathbf{q_h}=\begin{bmatrix}x_u & y_u & z_u & \psi\end{bmatrix}^T$$

Where the velocities are represented by:

$$\dot{\mathbf{q}}_\mathbf{h}=\begin{bmatrix}u_l & u_m & u_n & \omega\end{bmatrix}^T$$

## EXPERIMENTAL RESULTS

Grupo de Investigación
Automatizacion
Robotica
Sistemas Inteligentes

# IEA/AIE 2020

The 33th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems

21-24, July, 2020 --> 22-25, September, 2020 (postponed!)

Kitakyushu, JAPAN

The 33th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems

**IEA/AIE 2020**

## Certificate of presentation

The paper titled:

“Non-Linear Control of Aerial Manipulator Robots Based on Numerical Methods” (Paper ID #106)

has been presented at The 33th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE 2020), held in Kitakyushu, JAPAN, September 22 - 25, 2020.
The speakers of this paper were,

***David F. Grijalva, Jaime A. Alegría, Víctor H. Andaluz and Cesar Naranjo***

Prof. Hamido FUJITA,
General Chair, IEA/AIE 2020

藤田 ハミド

arsi
Grupo de Investigación
Automatización
Robótica
Sistemas Inteligentes

# Itinerario

- INTRODUCCIÓN
- MODELACIÓN CINEMÁTICA
- ALGORITMO DE CONTROL
- RESULTADOS OBTENIDOS
- CONCLUSIONES

# Itinerario

- **INTRODUCCIÓN**
- MODELACIÓN CINEMÁTICA
- ALGORITMO DE CONTROL
- RESULTADOS OBTENIDOS
- CONCLUSIONES

# Evolución de la Robótica

La robótica ha evolucionado mucho y ahora está presente en varias áreas del campo industrial.

Los vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como drones, son objetos voladores que no están tripulados por un piloto.

Es necesario incluir un brazo robótico que pueda limitar la ejecución del vehículo de tareas más complejas y precisas.

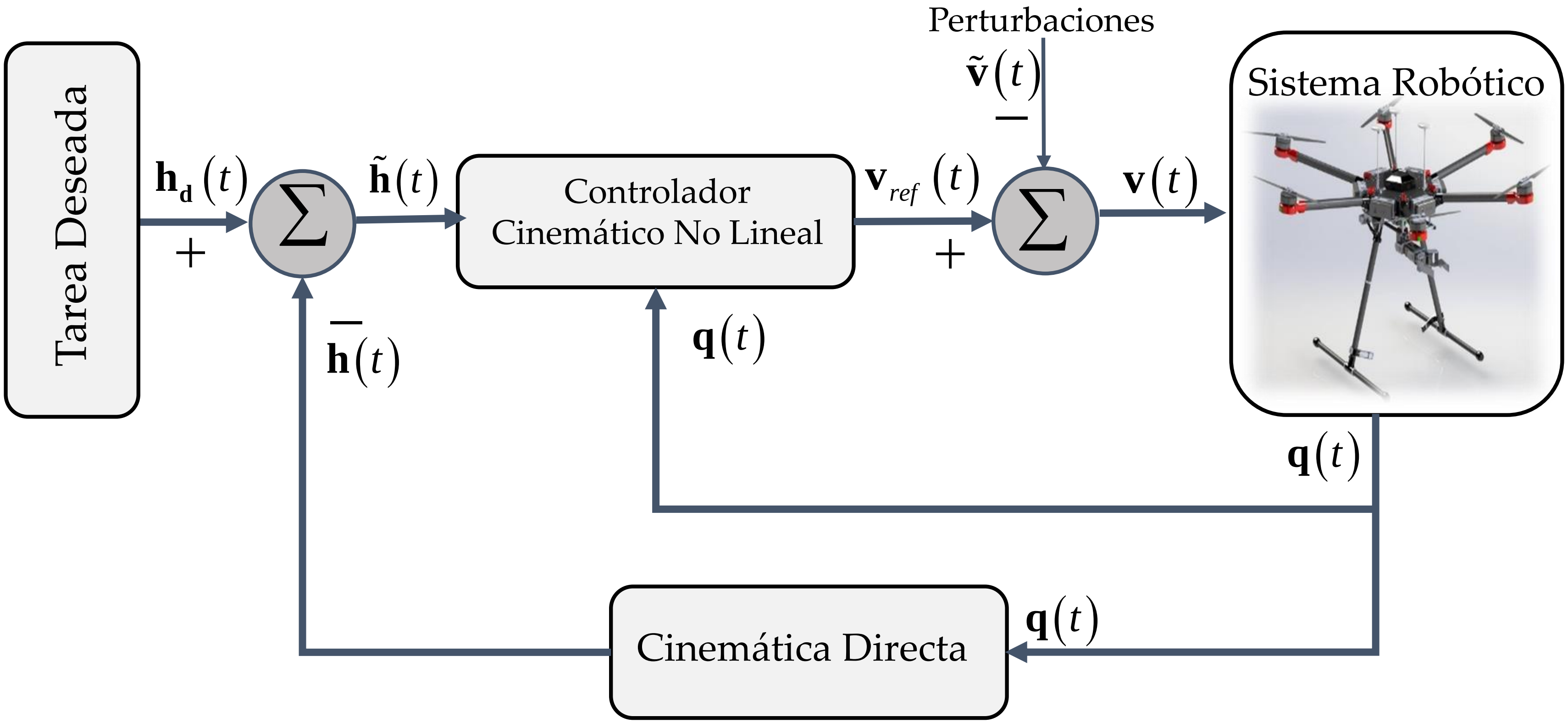
# Aplicaciones de los Manipuladores Aéreos

Campo Militar

Campo Comercial

Campo Industrial

# Algoritmo De Control



Tarea Deseada

$\mathbf{h}_\mathbf{d}(t)$

$+$

$\sum$

$\tilde{\mathbf{h}}(t)$

Controlador
Cinemático No Lineal

$\mathbf{v}_{ref}(t)$

$+$

Perturbaciones

$\tilde{\mathbf{v}}(t)$

$-$

$\sum$

$\mathbf{v}(t)$

Sistema Robótico

$\mathbf{q}(t)$

$-$

$\mathbf{h}(t)$

$\mathbf{q}(t)$

$\mathbf{q}(t)$

Cinemática Directa

# Objetivo General

Proponer un **algoritmo de control avanzado** para el seguimiento autónomo de trayectoria de un robot manipulador aéreo, conformado por brazo robótico sobre un vehículo aéreo no tripulado.

# Objetivos Específicos

- ✓ Investigar las **características de funcionamiento de un robot manipulador aéreo**, a fin de implementar algoritmos de control en lazo cerrado basados en el modelo del robot.
- ✓ **Modelar la cinemática de un robot manipulador aéreo** conformado por un vehículo aéreo no tripulado y un brazo robótico, a fin de **determinar las características y restricciones de movimiento** del robot.
- ✓ **Identificar y validar la estructura del modelo cinemático** a fin de ser utilizado en un algoritmo de control avanzados.
- ✓ **Proponer un algoritmo de control avanzado** para el control autónomo de seguimiento de trayectoria. Además, analizar matemáticamente la estabilidad y robustez del algoritmo de control propuesto.
- ✓ Realizar **pruebas experimentales**, a fin de evaluar el desempeño del algoritmo de control.

# Itinerario

INTRODUCCIÓN

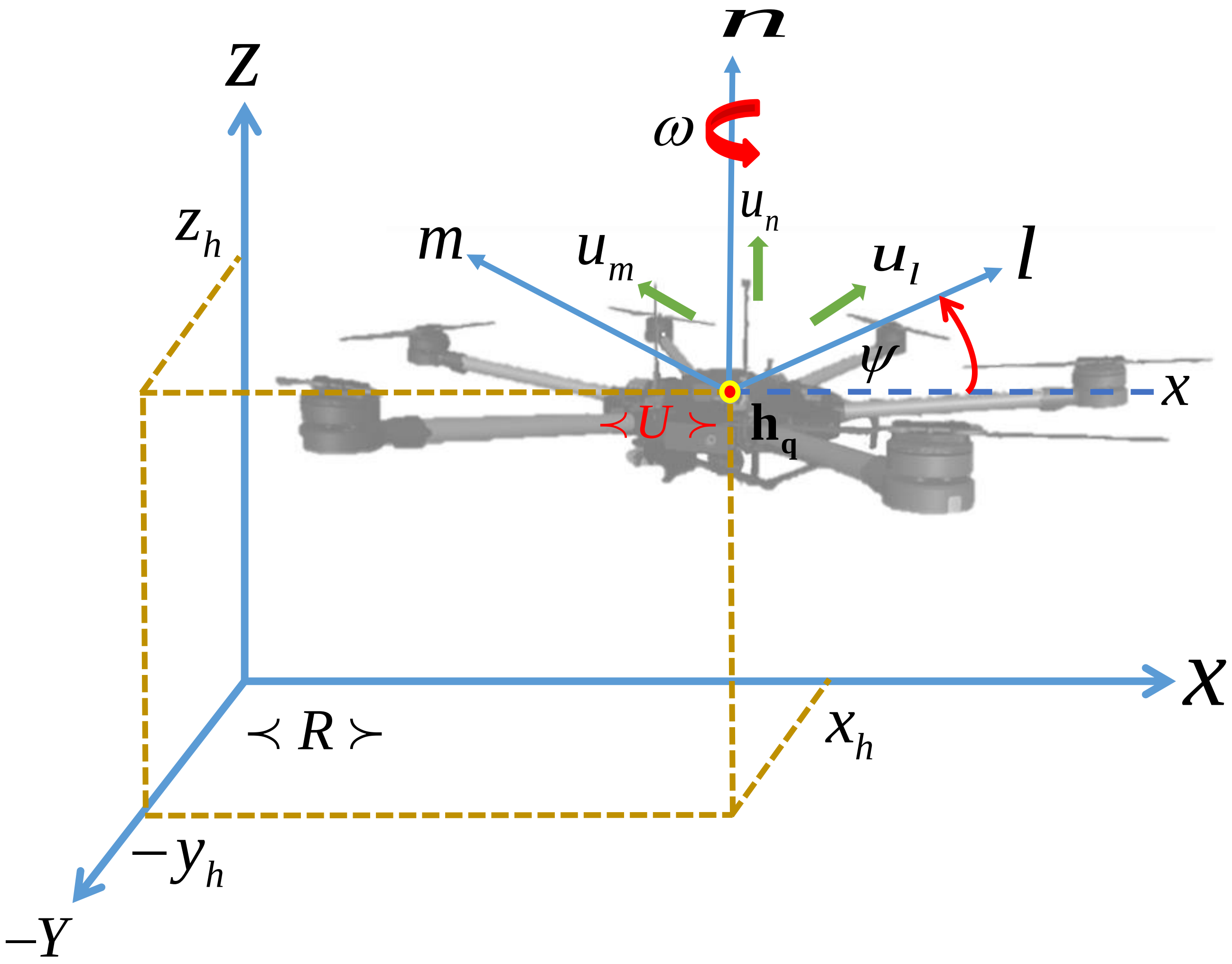
**MODELACIÓN CINEMÁTICA**

ALGORITMO DE CONTROL

RESULTADOS OBTENIDOS

CONCLUSIONES

# Plataforma Móvil



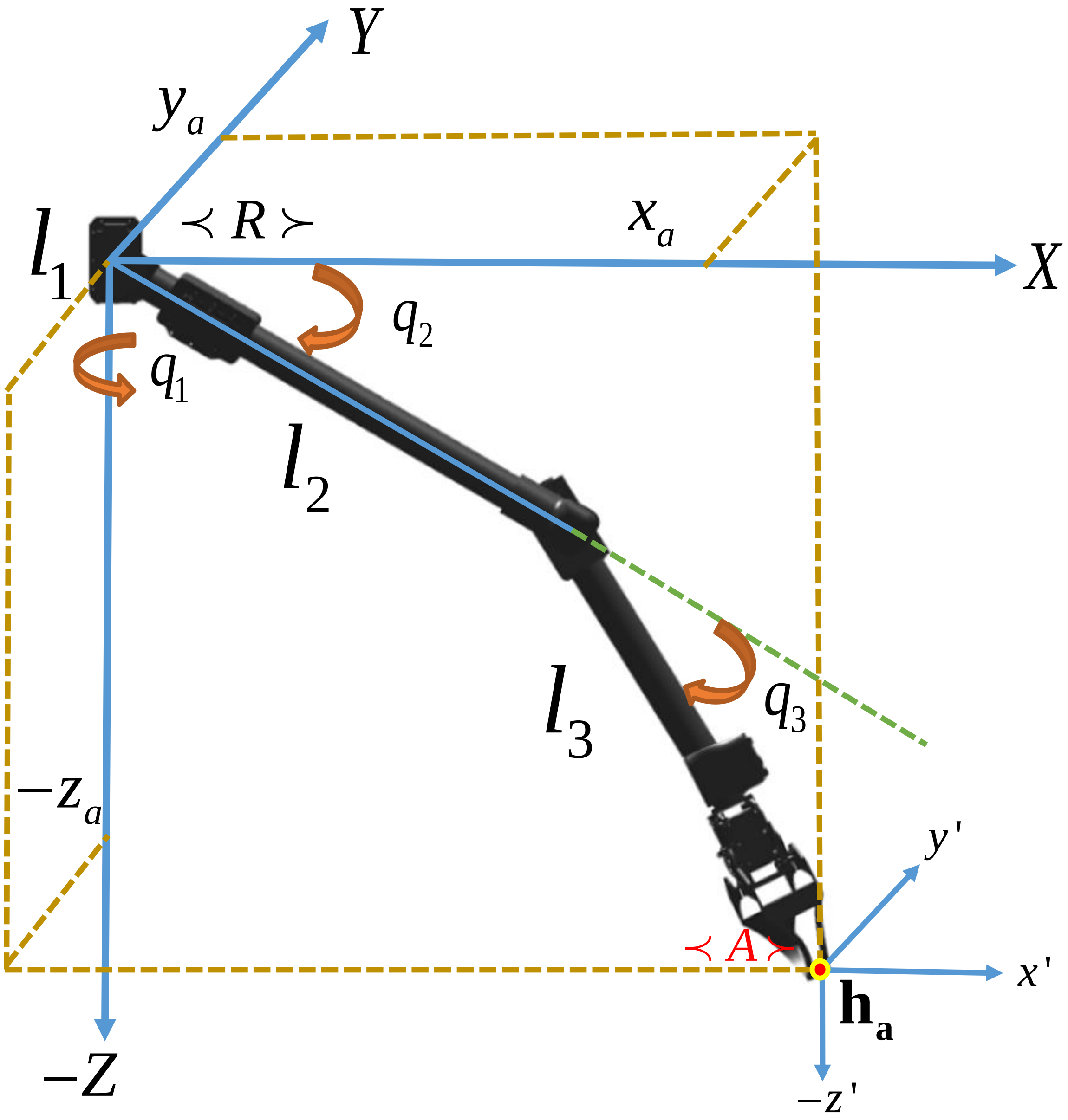
# Plataforma Móvil

## Modelo Cinemático

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_{q_x} \\ \dot{h}_{q_y} \\ \dot{h}_{q_z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_l \\ u_m \\ u_n \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{h}}_{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}_{\mathbf{h}}(\psi(t))\mathbf{v}_{\mathbf{h}}(t)$$

# Brazo Robótico



# Brazo Robótico

## Cinemática Directa

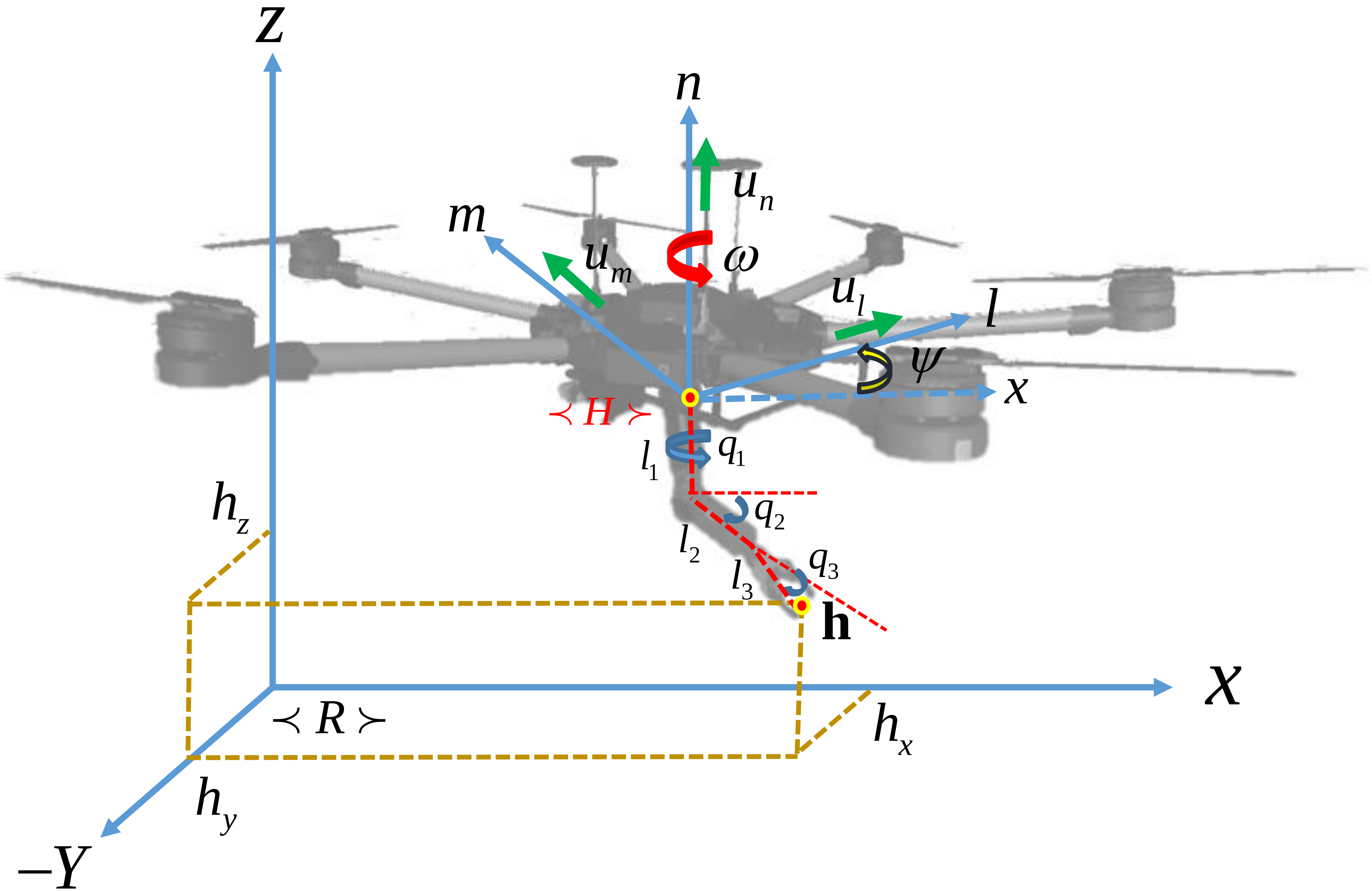
$$\begin{cases} h_{a_x} = l_2\cos(q_2)\cos(q_1) + l_3\cos(q_2+q_3)\cos(q_1) \\ h_{a_y} = l_2\cos(q_2)\sin(q_1) + l_3\cos(q_2+q_3)\sin(q_1) \\ h_{a_z} = -l_1 + l_2\sin(q_2) + l_3\sin(q_2+q_3) \end{cases}$$

## Modelo Cinemático

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_{a_x} \\ \dot{h}_{a_y} \\ \dot{h}_{a_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(l_2S_1C_2 + l_3S_1C_{23}) & -(l_2C_1S_2 + l_3C_1S_{23}) & -(l_3C_1S_{23}) \\ l_2C_1C_2 + l_3C_1C_{23} & -(l_2S_1S_2 + l_3S_1S_{23}) & -l_3S_1S_{23} \\ 0 & l_2C_2 + l_3C_{23} & l_3C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{h}}_{\mathbf{a}}(t) = \mathbf{J}_{\mathbf{a}}(\mathbf{q}(t))\,\mathbf{v}_{\mathbf{a}}(t)$$

# Robot Manipulador Aéreo



# Robot Manipulador Aéreo

## Cinemática Directa

$$\begin{cases} h_x = x_h + l_2 \cos\left(q_1 + \psi\right)\cos\left(q_2\right) + l_3 \cos\left(q_1 + \psi\right)\cos\left(q_2 + q_3\right) \\ h_y = y_h + l_2 \sin\left(q_1 + \psi\right)\cos\left(q_2\right) + l_3 \sin\left(q_1 + \psi\right)\cos\left(q_2 + q_3\right) \\ h_z = z_h - l_1 + l_2 \sin\left(q_2\right) + l_3 \sin\left(q_2 + q_3\right) \\ \psi \end{cases}$$

## Modelo Cinemático

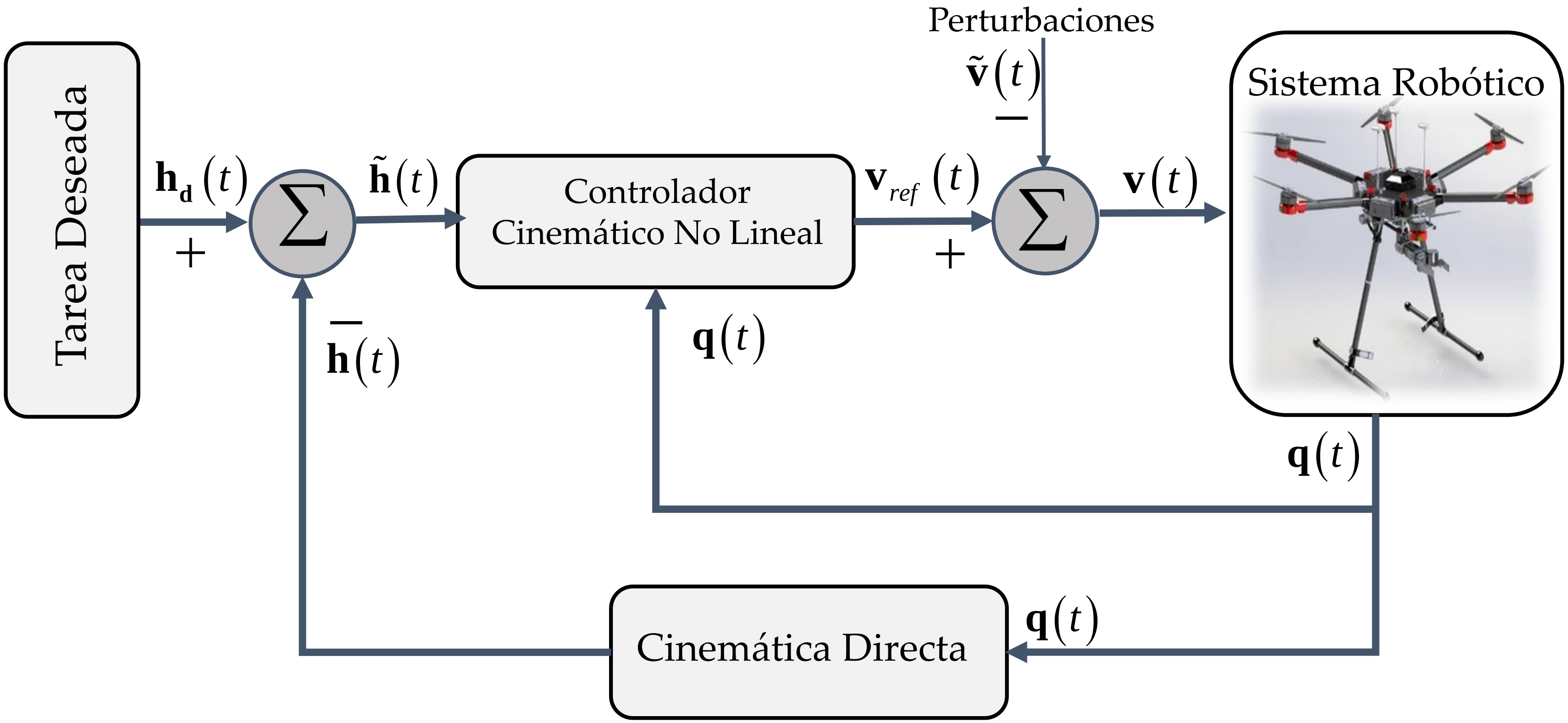
$$\begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{h}_z \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi & 0 & -\left(l_2 S_{1\psi} C_2 + l_3 S_{1\psi} C_{23}\right) & -\left(l_2 S_{1\psi} C_2 + l_3 S_{1\psi} C_{23}\right) & -\left(l_2 C_{1\psi} S_2 + l_3 C_{1\psi} S_{23}\right) & -l_3 C_{1\psi} S_{23} \\ S_\psi & C_\psi & 0 & \left(l_2 C_{1\psi} C_2 + l_3 C_{1\psi} C_{23}\right) & \left(l_2 C_{1\psi} C_2 + l_3 C_{1\psi} C_{23}\right) & -\left(l_2 S_{1\psi} S_2 + l_3 S_{1\psi} S_{23}\right) & -l_3 S_{1\psi} S_{23} \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & l_2 C_2 + l_3 C_{23} & l_3 C_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_l \\ u_m \\ u_n \\ \omega \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{h}}\left(t\right) = \mathbf{J}\left(\mathbf{q}\left(t\right)\right)\mathbf{v}\left(t\right)$$

# Itinerario

- INTRODUCCIÓN
- MODELACIÓN CINEMÁTICA
- **ALGORITMO DE CONTROL**
- RESULTADOS OBTENIDOS
- CONCLUSIONES

# Algoritmo De Control



Tarea Deseada

$\mathbf{h_d}(t)$

$+$

$\sum$

$\tilde{\mathbf{h}}(t)$

$-$

$\bar{\mathbf{h}}(t)$

Controlador
Cinemático No Lineal

$\mathbf{q}(t)$

$\mathbf{v}_{ref}(t)$

$+$

Perturbaciones

$\tilde{\mathbf{v}}(t)$

$-$

$\sum$

$\mathbf{v}(t)$

Sistema Robótico

$\mathbf{q}(t)$

Cinemática Directa

$\mathbf{q}(t)$

# Algoritmo de Control

Modelo Cinemático:

$$\dot{\mathbf{h}}(t)=\mathbf{J}(\mathrm{q}(t))\mathbf{v}(t) \qquad (1)$$

Modelo discretizado:

$$\mathbf{h}(k+1)=\mathbf{h}(k)+T_0\mathbf{J}(\mathbf{q}(k))\mathbf{v}_{ref}(k) \qquad (2)$$

Propiedad de Márkov:

$$\mathbf{h}(k+1)=\mathbf{h}_d(k+1)-\mathbf{W}(\mathbf{h}_d(k)-\mathbf{h}(k)) \qquad (3)$$

Ley de control propuesta (2) = (3)

$$\boxed{\mathbf{v}_{ref}(k)=\frac{1}{T_0}\mathbf{J}^{\#}(\mathbf{q}(k))\left(\mathbf{h}_d(k+1)-\mathbf{W}(\mathbf{h}_{\mathbf{d}}(k)-\mathbf{h}(k))-\mathbf{h}(k)\right)} \qquad (4)$$

# Análisis de Estabilidad

Ecuación de Lazo Cerrado:

$$\mathbf{v}(k) = \mathbf{v}_{ref}(k)$$

Modelo Discretizado:

$$\mathbf{h}(k+1) = \mathbf{h}(k) + T_0 \mathbf{J}(\mathbf{q}(k))\mathbf{v}(k) \qquad (2)$$

Ley de control propuesta:

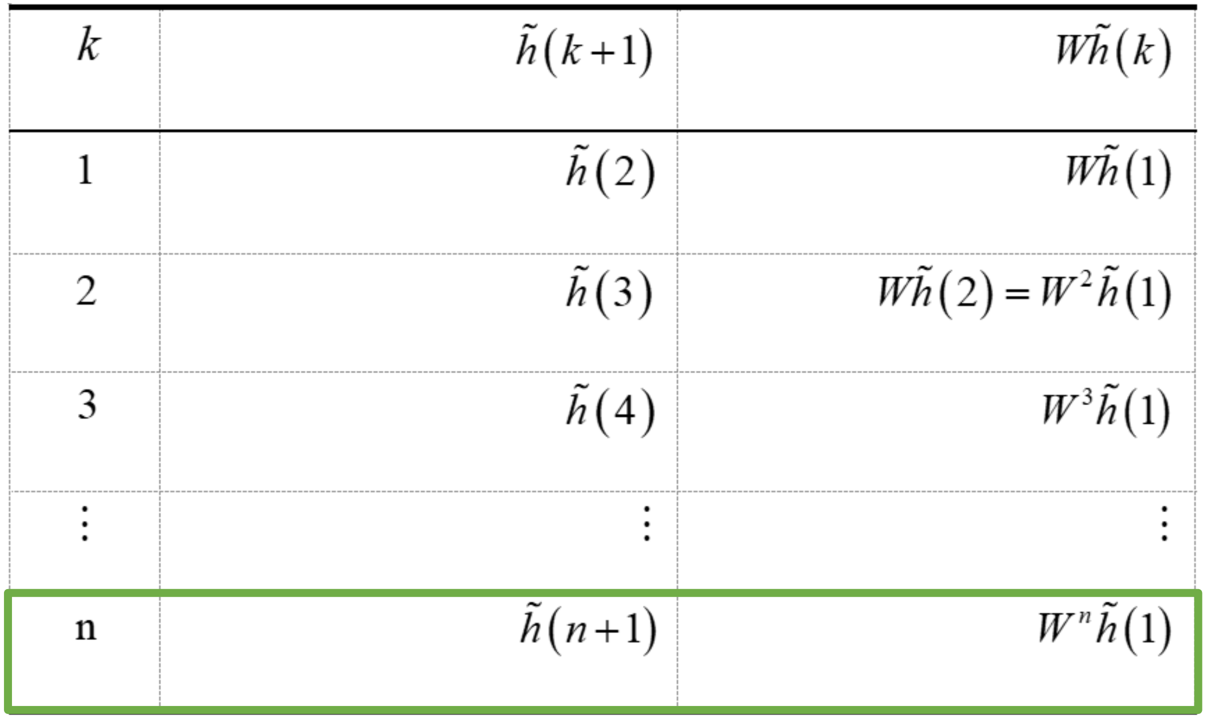
$$\mathbf{v}_{ref}(k) = \frac{1}{T_0}\mathbf{J}^{\#}(\mathbf{q}(k))\left(\mathbf{h}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{h_d}(k) - \mathbf{h}(k)) - \mathbf{h}(k)\right) \qquad (4)$$

Se igualan las velocidades de: $(2)$ y $(4)$

$$\mathbf{h}(k+1) - \mathbf{h}(k) = T_0 \mathbf{J}(\mathbf{q}(k))\left(\frac{1}{T_0}\mathbf{J}^{\#}(\mathbf{q}(k))\left(\mathbf{h}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{h_d}(k) - \mathbf{h}(k)) - \mathbf{h}(k)\right)\right)$$

$$\boxed{\tilde{\mathbf{h}}(k+1) = \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(k)}$$

# Análisis de Estabilidad



| $k$ | $\tilde{h}(k+1)$ | $W\tilde{h}(k)$ |
|---|---|---|
| 1 | $\tilde{h}(2)$ | $W\tilde{h}(1)$ |
| 2 | $\tilde{h}(3)$ | $W\tilde{h}(2)=W^2\tilde{h}(1)$ |
| 3 | $\tilde{h}(4)$ | $W^3\tilde{h}(1)$ |
| $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ |
| n | $\tilde{h}(n+1)$ | $W^n\tilde{h}(1)$ |

El controlador es asintóticamente estable:

$$\therefore \quad \tilde{\mathbf{h}}(k)\rightarrow 0,\ \text{cuando } k\rightarrow\infty. \qquad \text{y} \quad 0<diag\left(W_{11},W_{22},W_{33}\right)<1$$

# Análisis de Robustez

Ecuación de Lazo Cerrado con Perturbación : $\mathbf{v}(k) \cong \mathbf{v}_{ref}(k) - \tilde{\mathbf{v}}(k)$

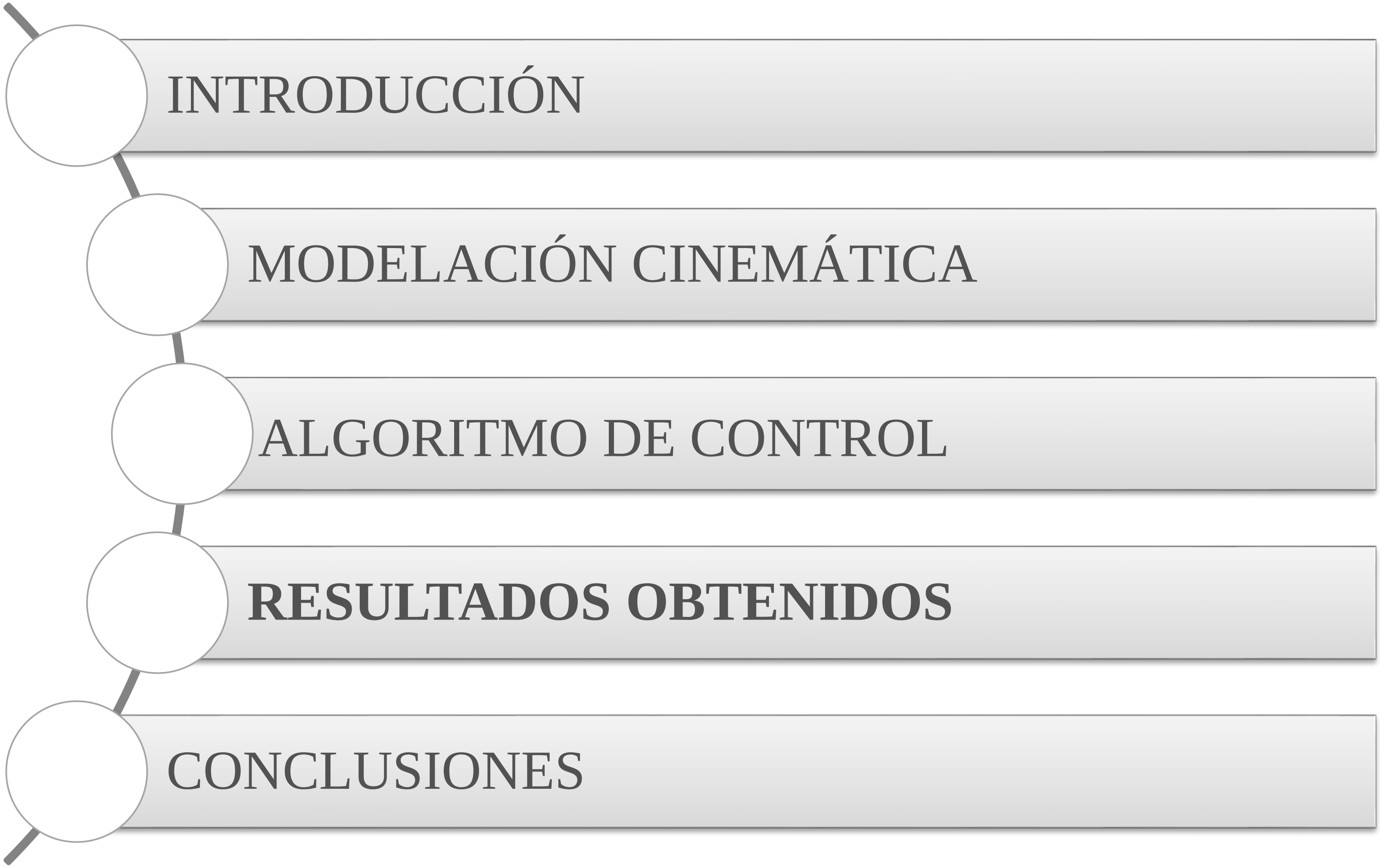
Se reemplazan las velocidades de: $(2)$ y $(4)$

$$\mathbf{h}(k+1) - \mathbf{h}(k) = T_0 \mathbf{J}(\mathbf{q}(k)) \left( \frac{1}{T_0} \mathbf{J}^{\#}(\mathbf{q}(k)) \left( \mathbf{h}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{h_d}(k) - \mathbf{h}(k)) - \mathbf{h}(k) \right) - \tilde{\mathbf{v}}(k) \right)$$

$$\boxed{\tilde{\mathbf{h}}(k+1) = \mathbf{W}\tilde{\mathbf{h}}(k) + T_0 \mathbf{J}(\mathbf{q}(k)) \tilde{\mathbf{v}}(k)}$$

$$\boxed{\therefore \quad \left\| \tilde{\mathbf{h}}(k) \right\| < \frac{\left\| T_0 \mathbf{J}(\mathbf{q}(k)) \tilde{\mathbf{v}}(k) \right\|}{\lambda W_{\min}}}$$

# Itinerario



INTRODUCCIÓN

MODELACIÓN CINEMÁTICA

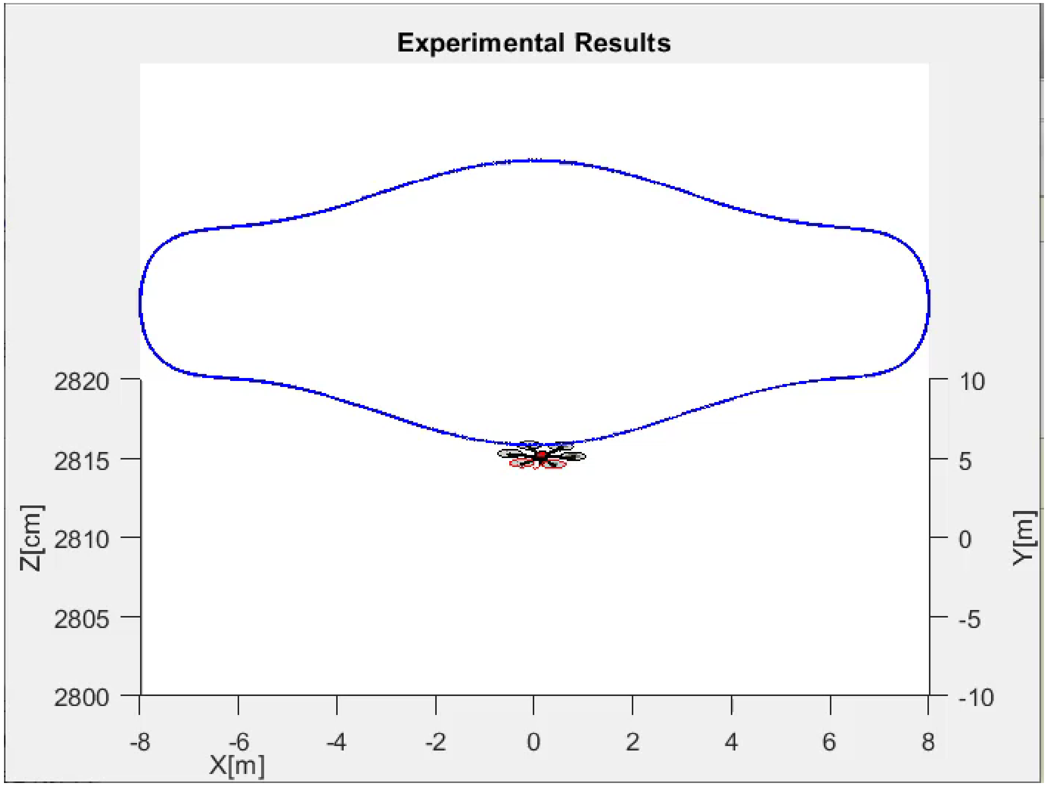
ALGORITMO DE CONTROL

**RESULTADOS OBTENIDOS**

CONCLUSIONES

# Resultados Obtenidos

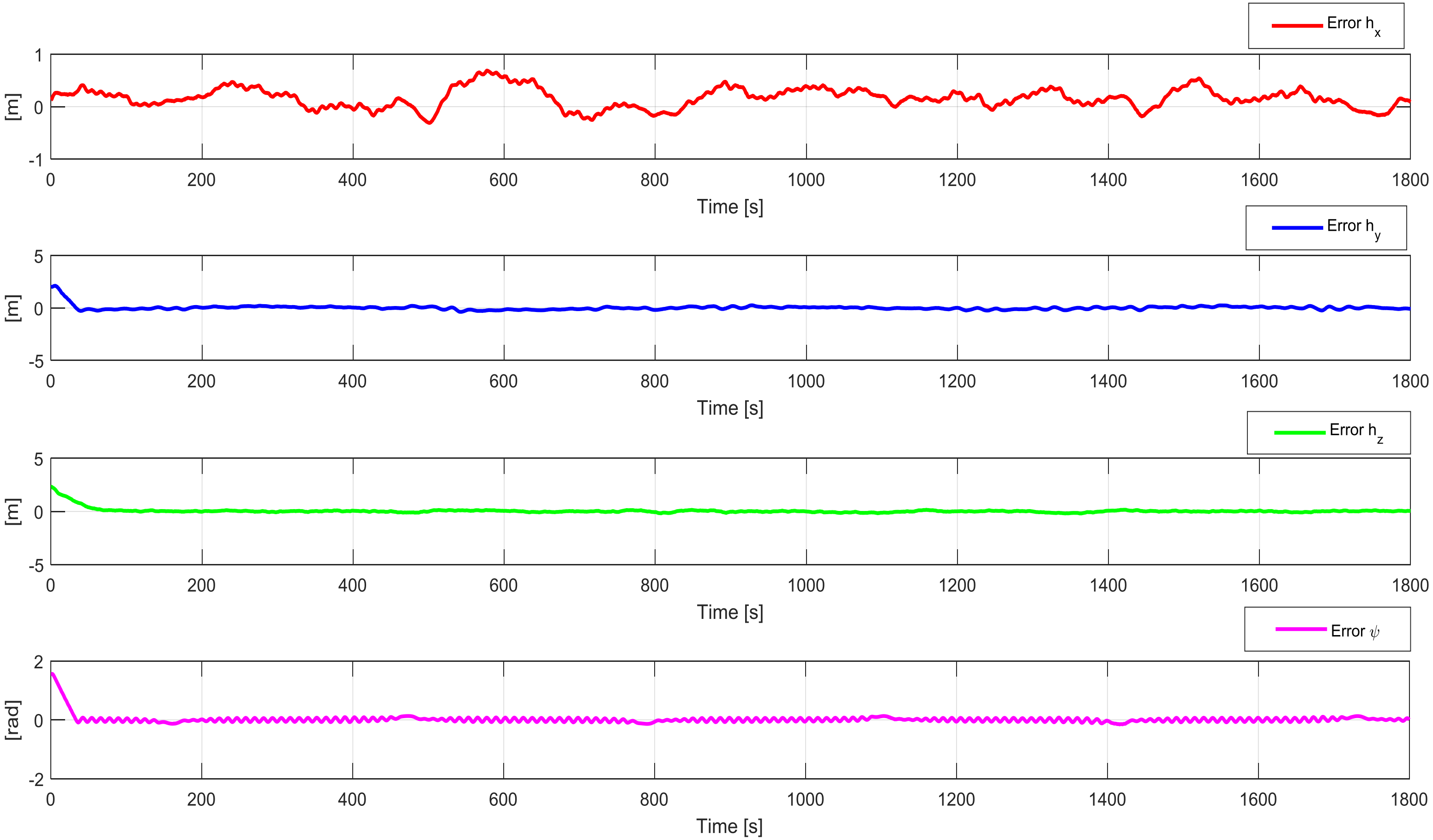
# Resultados Obtenidos



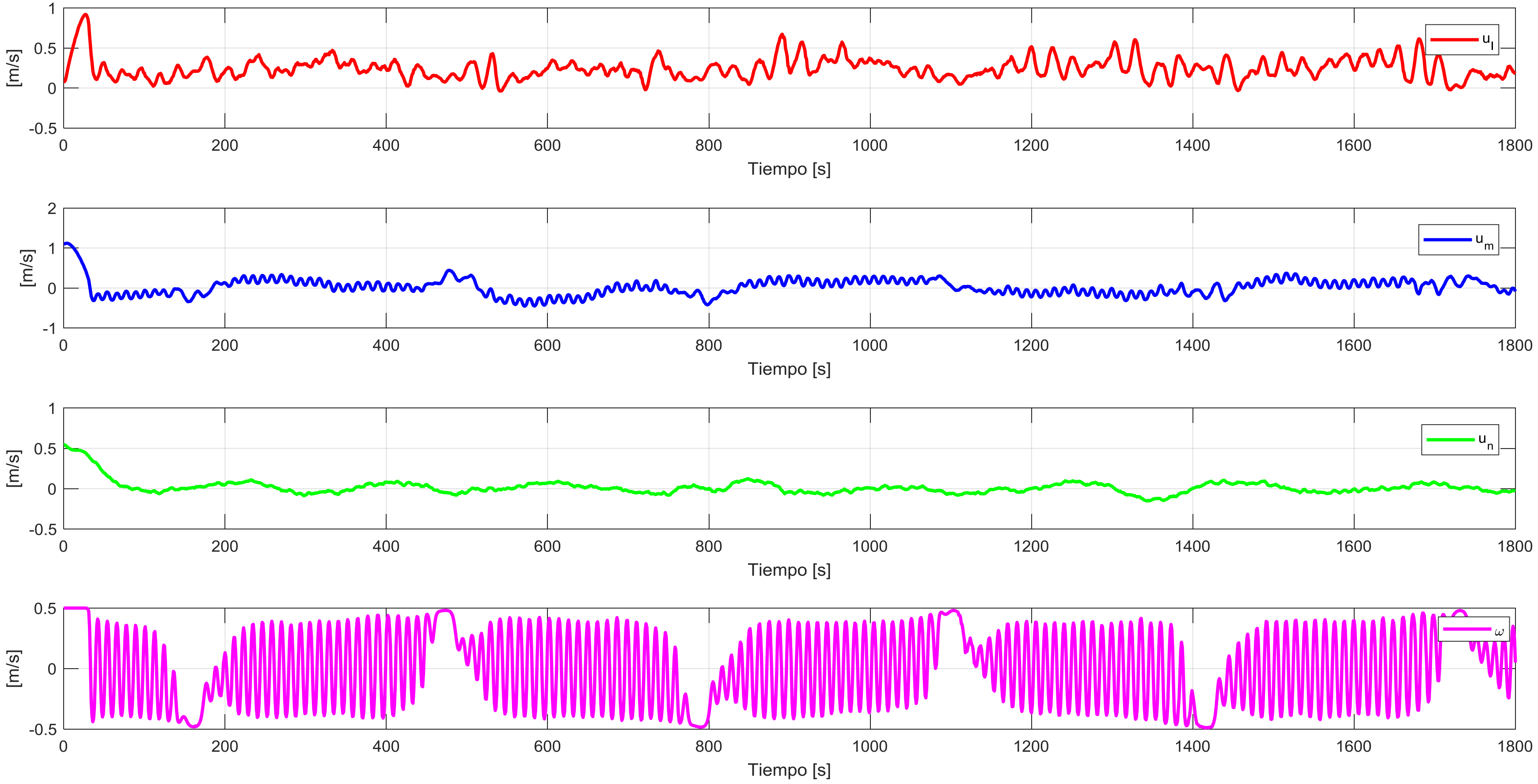
Movimiento estroboscópico
basado en datos reales

Vuelo del Manipulador
Móvil

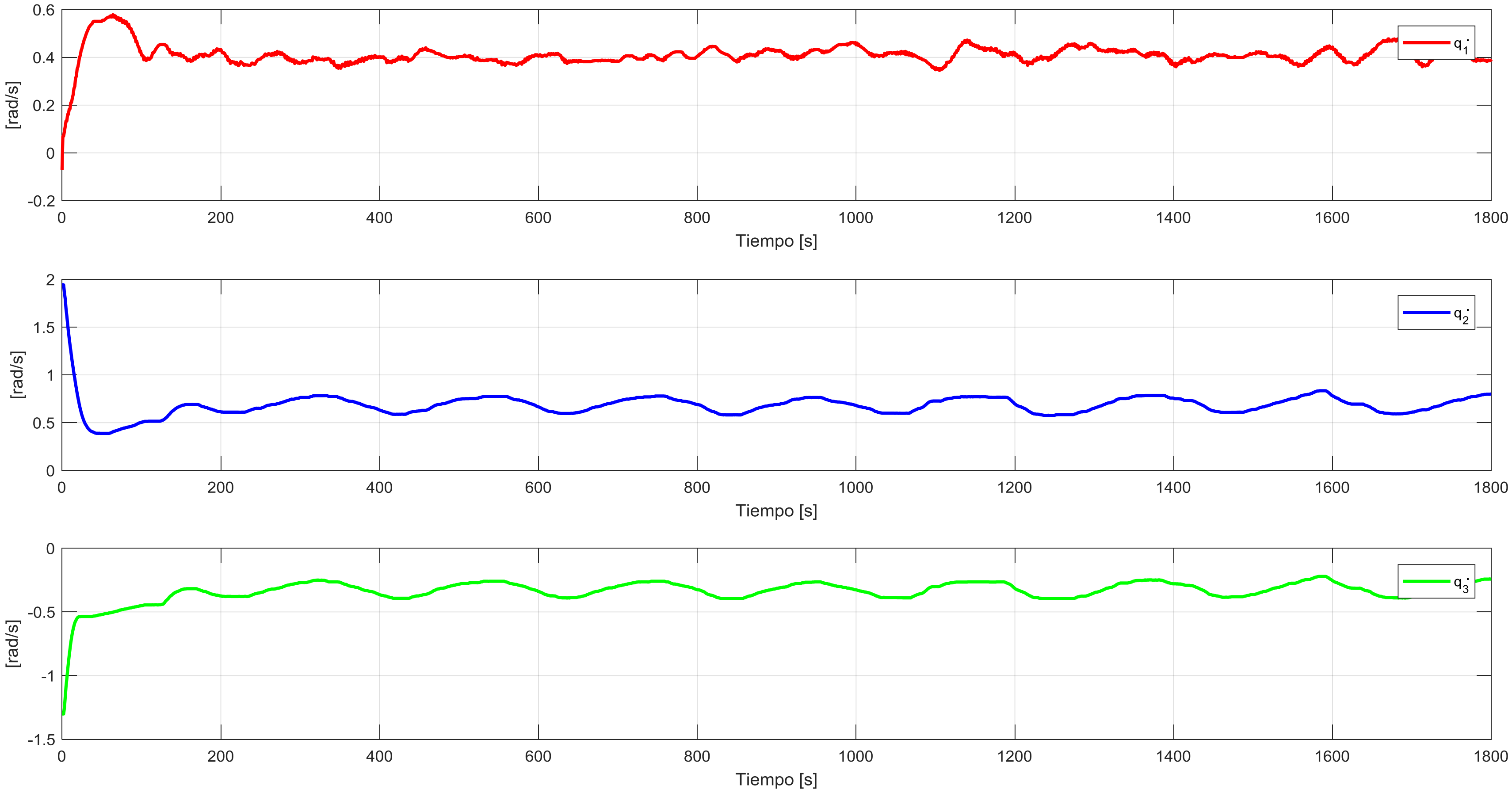
# Errores de Posición



# Acciones de Control de la Plataforma



# Acciones de Control del Brazo Robótico



# ITINERARIO

- INTRODUCCIÓN
- MODELACIÓN CINEMÁTICA
- ALGORITMO DE CONTROL
- RESULTADOS OBTENIDOS
- **CONCLUSIONES**

# CONCLUSIONES

- ✓ El **robot manipulador aéreo** es considerado como un sistema **holónomico** debido a que puede movilizarse por toda el área de trabajo, sin **ninguna restricción de movimiento.**
- ✓ El **modelo cinemático** del robot manipulador aéreo **describe el comportamiento ideal** del mismo, ya que **no considera las perturbaciones ni la dinámica** del sistema robótico.
- ✓ El algoritmo de control propuesto es asintóticamente estable mientras los valores de la diagonal de la matriz de peso de los errores **W** sean mayores a 0 y menores a 1.
- ✓ Mediante el análisis de robustez se determinó que los errores se encuentran saturados en función de las velocidades de perturbación del sistema.
- ✓ Mediante los resultados de las pruebas experimentales se demostró la estabilidad y robustez del controlador propuesto, debido que a pesar de las perturbaciones del medio cumplió con el seguimiento de la trayectoria establecida.

# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

## CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

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

# “CONTROL NO LINEAL DE ROBOTS MANIPULADORES AÉREOS BASADO EN MÉTODOS NUMÉRICOS”

**Autores:**
Alegría Vizuete, Jaime Alejandro
Grijalva López, David Fernando

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. ***Tutor***
Ing. César A. Naranjo, Mg. ***Cotutor***